

Universidad
Autónoma
Metropolitana



Casa abierta al tiempo **Azcapotzalco**

***“EVALUACIÓN DE LA MOVILIDAD DE METALES TÓXICOS EN
POLVOS RECOLECTADOS EN UNA AVENIDA DE ALTO AFORO
VEHICULAR DE LA CIUDAD DE MÉXICO”***

Tesis

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias e Ingeniería Ambientales

Presenta:

I.Q Santos Camacho José Antonio

Asesor:

Dr. Julio Flores Rodríguez

MÉXICO, DF.

Mayo 2016

Agradecimientos

Por el apoyo, la ayuda, ánimo y la disposición que siempre tuvieron conmigo durante mis estudios de maestría:

*Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por la beca otorgada No. Becario 305954.*

A mi madre María de Lourdes Camacho por todo su cariño y por ayudarme a ser lo que soy, por guiar mi camino y estar siempre junto a mí.

A mi padre José Santos Zamora por todo su apoyo condicional a lo largo de mi vida y durante mi formación, agradecer su sacrificio y esfuerzo constante, porque ha sido para mí un gran hombre y que siempre he admirado y gracias por guiar mi vida.

A mis hermanas Maribel Santos y Norma Santos por todo su cariño y por brindarme su apoyo, consejos, y alentarme a seguir adelante, a mis cuñados: Raúl Flores y Baltazar Miranda por todo su apoyo incondicional que me han brindado.

*Agradezco Especialmente al **Dr. Julio Flores Rodríguez**⁺ por ser el asesor de esta tesis, por su apoyo, experiencias, porque nunca estimo esfuerzos y tiempo para poder llevar a cabo este trabajo. Por sus notables conocimientos que me brindo a lo largo de mi formación académica, dedicándome su valioso tiempo y amistad. Sobre todo porque fue un excelente profesor, científico y ser humano.*

Agradecimientos

También deseo agradecer a mis sinodales, Dra. Violeta Múgica Álvarez, Dr. Francisco García Franco, Dr. Adolfo Hernández Moreno y a la Dra. Mabel Vaca Mier, por sus críticas, recomendaciones y consejos al proyecto que llevaron al pulimiento del mismo. Pero sobre todo por concederme la dicha de su valioso tiempo, compartir sus conocimientos y su amistad.

Estoy en deuda con todos los integrantes del Laboratorio de Calidad de Agua y Residuos, quienes además de realizar su trabajo, aportaron su esfuerzo y dedicación para generar gran parte de los resultados que sirvieron para este estudio.

Finalmente a mis compañeros de generación: Lizet, Anbú, Estefanía, Verónica, Sarai, Marcos, Israel y Luis. A mis compañeros de Laboratorio de Toxicología Ambiental: Jesús Mendoza, José Luis y Jesús Oliva.

Resumen

En este estudio se determinó la concentración de metales totales y por tamaño de partícula de plomo, cadmio, hierro, zinc y cobre en muestras de polvo recolectadas de la avenida Paseo de la Reforma con diferente intensidad de tráfico. La extracción de metales en polvos se llevó a cabo mediante digestión ácida, los análisis se realizaron por espectroscopia de absorción atómica. Los niveles encontrados siguieron el orden $Fe > Pb > Cu > Zn > Cd$ en todos los sitios de muestreo, los cuales oscilaron entre 64027 a 36734; 239 a 83; 128 a 67; 44 a 18 y 2 a 5 mg/kg respectivamente. Los sitios con mayor presencia de metales tóxicos son la glorieta de San Marín y Cuauhtémoc y la de menor concentración es la glorieta del Ángel de la Independencia. A partir de las concentraciones totales se calcularon el factor de enriquecimiento, el índice de geoacumulación, el factor de contaminación, grado de contaminación y el factor potencial de riesgo ecológico, los cuales sirven para indicar que tan enriquecidos o contaminados se encuentran los polvos. Los factores revelaron el siguiente orden de concentración $Cd > Pb > Cu > Zn$ lo cual indica que hay una grado de contaminación de tipo antropogénico, destacándose los metales de plomo y cadmio.

Fueron establecidos diez sitios de muestreo, de las muestras obtenidas se realizó una separación granulométrica con diferentes tamices, más del 60% de las partículas tuvieron un tamaño mayor a 250 μm . En cuanto a las concentraciones de los metales por clase granulométrica se observa para el caso del plomo, cadmio y hierro, las concentraciones más altas se encuentran en las partículas de mayor tamaño (1190 μm). En caso de la concentración del cobre no existe una tendencia definida en los tamaños de partícula y la distribución de la concentración del zinc es homogénea, presentando concentraciones muy cercanas en todos los tamaños de partícula. El coeficiente correlación de Spearman y Análisis de Componentes Principales, demostraron una fuerte asociación entre metales, flujo vehicular y sitios de muestreo, además confirmó la contribución de las fuentes antropogénicas como el flujo vehicular, fugas de aceite, desgaste de piezas metálicas etc.

La simulación del tracto gastrointestinal, por el método BCR, fue utilizada para evaluar el impacto sobre la salud, se prepararon varias soluciones que simulaban la composición de cada parte del sistema gastrointestinal. Los resultados de la simulación mostraron que las concentraciones más altas de plomo corresponden a la forma química más estable y menos peligrosa, como es la fracción residual (F4) en la simulación del recto, lo cual implica el menor riesgo a la salud, mientras que el cadmio y el cobre sucedió lo contrario, ya que se encontraron concentraciones más altas en la fracción oxidable (F3) en la simulación del Intestino grueso lo cual implica biodisponibilidad y un menor riesgo a la salud. Mientras que la concentración del zinc se encuentra más homogenizada en las cuatro fracciones.

A partir de las concentraciones obtenidas de cada fracción del método BCR se determinó el factor de movilidad. Los resultados sugirieron que la movilidad y biodisponibilidad del hierro son bajas no superiores al 7 %, sin embargo para el zinc se tienen valores relativamente altos hasta del 59% de movilidad.

ABSTRACT

In this study the total metal concentration and particle size of lead, cadmium, iron, zinc and copper in dust samples collected from the Paseo de la Reforma Avenue with different traffic intensity is determined. The powder metal extraction was carried out by acid digestion analyzes were performed by atomic absorption spectroscopy. The levels found followed Fe> Pb> Cu> Zn> Cd order in all sampling sites, which ranged from 64,027 to 36,734; 239-83; 128-67; 44-18 and 2 to 5 mg / kg respectively. The sites with greater presence of toxic metals are the square of San Marin and Cuauhtemoc and the lowest concentration is the square of the Angel of Independence. From the total concentrations enrichment factor, the rate of geoaccumulation, pollution factor, degree of contamination and potential ecological risk factor is calculated, which serve to indicate how rich or powders are contaminated. The factors revealed the following order of concentration Cd> Pb> Cu> Zn which indicates a degree of contamination of anthropogenic type, especially the metals lead and cadmium.

They were established ten sites sampling of samples obtained a particle size separation was performed with different screens, over 60% of the particles had a size greater than 250 microns. As to the concentrations of metals granulometric class observed for the case of lead, cadmium and iron, the highest concentrations found in the larger particles (1190 microns). If the concentration of copper no trend defined particle size distribution and concentration of zinc is homogeneous, presenting very close concentrations in all particle sizes. The coefficient Spearman correlation and principal component analysis showed a strong association between metals, traffic flow and sampling sites, also confirmed the contribution of anthropogenic sources such as traffic flow, oil leaks, wear of metal parts etc.

The simulation of the gastrointestinal tract, the BCR method was used to assess the impact on health, various solutions that mimicked the composition of each part of the gastrointestinal system were prepared. The simulation results showed that the highest concentrations of lead correspond to the more stable and less dangerous chemical form, as the residual fraction (F4) in the simulation of the rectum, which involves less risk to health, while cadmium and copper happened otherwise, since higher concentrations were found in the oxidizable fraction (F3) in the simulation of large intestine which implies bioavailability and reduced risk to health. While the concentration of zinc is more homogenized in four fractions.

From the concentrations obtained from each fraction of BCR mobility factor method it was determined. The results suggested that the mobility and bioavailability of iron are low not exceed 7%, however for zinc have relatively high values up to 59% of mobility.

1.-Introducción	1
1.1.- justificación	2
1.2.- Hipótesis	3
1.3.- Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	4
2.- Estado del arte	5
2.1.- Principales Fuentes de Metales Tóxicos	5
2.2.- Deposición Atmosférica	6
2.3.- Metales en Polvos Urbanos	7
2.4.- Toxicidad de los Metales Pesados	11
2.4.1.- Cadmio	11
2.4.2.- Toxicocinética del Cadmio	12
2.4.3.- Hierro	13
2.4.4.- Toxicocinética del Hierro	13
2.4.5.- Plomo	14
2.4.6.- Toxicocinética del Plomo	16
2.4.7.- Cobre	17
2.4.8.- Toxicocinética del Cobre	17
2.4.9.- Zinc	18
2.4.10.- Toxicocinética del Zinc	19
2.5.- Índice de Geoacumulación (I _{geo})	19
2.6.- Factor de Enriquecimiento (FE)	20
2.7.- Factor de Contaminación (C _f) y Grado de Contaminación (C _d)	21
2.8.- Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI)	21
2.9.- Factor de Movilidad (FM)	22
2.10.- Evaluación de la Movilidad de los Metales Tóxicos	23
2.11.- Método BCR	23
2.11.1.- Descripción de las Extracciones Secuenciales del Método BCR	24
2.12.- Análisis de Componentes Principales	25

2.13.- Correlación de Spearman	26
2.14.- Normatividad	27
3.- Metodología y Desarrollo Experimental	30
3.1.- Diseño de Experimento	30
3.2.- Estrategia de Muestreo	31
3.3.- Flujo vehicular	32
3.4.- Sitio de Muestreo	32
3.5.- Descripción de la Zona de Muestreo	34
3.6.- Lavado de Material	34
3.7.- Tamizado	35
3.8.- Distribución Granulométrica	35
3.9.- Extracción de Metales Totales y por Tamaño de Grano	36
3.9.1.- Extracción de Metales Totales	36
3.9.2.- Extracción por Tamaño de Grano	36
3.10.- Metodología BCR	37
3.10.1.- Fracción Ácido Soluble	38
3.10.2.- Fracción Reducible	38
3.10.3.- Fracción Oxidable	38
3.10.4.- Fracción Residual	39
4.- Presentación de Resultados	41
4.1.- Sitios de Muestreo	41
4.2.- Flujo vehicular	41
4.3.- Reparto Granulométrico de las Muestras de Polvo	43
4.4.- Metales Totales	46
4.4.1.- Metales Totales por Punto de Muestreo	46
4.4.2.- Concentración de Hierro por Punto de Muestreo	47
4.4.3.- Concentración de Cadmio por Punto de Muestreo	48

4.4.4.- Concentración de Cobre por Punto de Muestreo	48
4.4.5.- Concentración de Plomo por Punto de Muestreo	49
4.4.6.- Concentración de Zinc por Punto de Muestreo	50
4.4.7.- Metales Totales de Otros Sitios	51
4.5.- Concentraciones de Metales Totales, en los Polvos por Tamaño Granulométrico	52
4.5.1.- Concentración de Metales Totales, en los Polvos de $250 < \text{Part} < 1190 \mu\text{m}$	52
4.5.2.- Concentración de Metales Totales, en los Polvos de $220 < \text{Part} < 250 \mu\text{m}$	53
4.5.3.- Concentración de Metales Totales, en los Polvos de $200 < \text{Part} < 220 \mu\text{m}$	54
4.5.4.- Concentración de Metales Totales, en los Polvos de $< 200 \mu\text{m}$	54
4.6.- Concentraciones de Cada Tipo de Metales Totales, en los Polvos por Tamaño Granulométrico	55
4.6.1.- Concentración de Hierro, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico	55
4.6.2.- Concentración de Zinc, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico	56
4.6.3.- Concentración de Plomo, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico	57
4.6.4.- Concentración de Cobre, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico	59
4.6.5.- Concentración de Cadmio, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico	59
4.7.- Evaluación de la Movilidad de los Metales Tóxicos (BCR, Community Bureau of Reference)	60
4.7.1.- Extracción Secuencial de Hierro	61
4.7.2.- Extracción Secuencial de Plomo	62
4.7.3.- Extracción Secuencial de Cadmio	64
4.7.4.- Extracción Secuencial de Cobre	65
4.7.5.- Extracción Secuencial de Zinc.....	67
5.- Análisis de Resultados	69
5.1.- Estadística de Metales Totales	69
5.1.1.- Correlación de Spearman Para Metales Totales	69
5.1.2.- Análisis de Componentes Principales de Metales Totales	70
5.1.3.- Correlación de Spearman Para Metales Totales y Flujo Vehicular	73

5.1.4.- Análisis de Componentes Principales de Metales Totales y Flujo Vehicular	74
5.2.- Índices y Factores de Contaminación de Metales Totales	77
5.2.1.- Factor de Enriquecimiento	77
5.2.2.- Índice de Geoacumulación	80
5.2.3.- Factor de Contaminación y Grado de Contaminación	82
5.2.4.- Factor Potencial de Riesgo Ecológico	83
5.2.5.- Resumen de los Índices de Contaminación	85
5.3.- Extracción Secuencial de Metales (BCR).....	86
5.4.- Factor de Movilidad (FM).....	86
5.5.- Estadística del Método BCR	88
5.5.1.- Correlación de Spearman de las Fracciones de la Extracción Secuencial BCR	88
5.5.2.- Análisis de Componentes Principales Entre Metales de las Fracciones de la Extracción Secuencial BCR	91
5.5.3.- Correlación de Spearman Entre Fracciones BCR y los Sitios de Muestreo	96
5.5.4.- Análisis de Componentes Principales Para Metales Tóxicos y los Sitios de Estudio	99
6.- Conclusiones	104
5.- Referencias	107

Índice de Tablas

página

2.1.- Concentraciones de Referencia Totales (CRT) por Tipo de Uso de Suelo	28
2.2.- Concentraciones de Metales Tóxicos en Polvos Relacionados con Efectos Tóxicos a la Salud	28
2.3.- Criterios de Calidad de los Suelos de Holanda, Canadá y Estados Unidos	29
4.1.- Muestra Obtenida por Glorieta	41
4.2.- Flujo vehicular que Circula por la Avenida Paseo de la Reforma	42
4.3.- Composición del Tamaño de Partícula de las Muestras Recolectadas	43
4.4.- Concentración de Metales Totales en Polvo Recolectados en Avenida Paseo de la Reforma	46
4.5.- Metales Tóxicos Presentes en Polvos en Diferentes Países	51
4.6.- Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos $250 < \text{Part} < 1190 \mu\text{m}$	53
4.7.- Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos $220 < \text{Part} < 250 \mu\text{m}$	53
4.8.- Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos $200 < \text{Part} < 220 \mu\text{m}$	54
4.9.- Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos $< 200 \mu\text{m}$	55
4.10.- Extracción Secuencial de Hierro	61
4.11.- Extracción Secuencial de Plomo	63
4.12.- Extracción Secuencial de Cadmio	64
4.13.- Extracción Secuencial de Cobre	66
4.14.- Extracción Secuencial de Zinc	67
5.1.- Estadística Descriptiva por Metal	69
5.2.- Matriz de Correlación de Spearman entre Metales Tóxicos	70
5.3.- Componentes Principales o Factores de Metales	71
5.4.- Estadística Descriptiva por Metal y Flujo Vehicular	74
5.5.- Matriz de Correlación de Spearman. Para Cada Tipo de Metal y Flujo vehicular Total ..	74
5.6.- Componentes Principales o Factores de Metales y Flujo Vehicular	75
5.7.- Concentraciones de Metales en la Corteza Terrestre	78
5.8.- Factores de Enriquecimiento de las Muestras de la Avenida Paseo de la Reforma	79

5.9.- Clasificación del Factor de Enriquecimiento (FE)	79
5.10.- Índice de Geoacumulación	80
5.11.- Clasificación de los índices de Geoacumulación	81
5.12.- Factor de Contaminación y Grado de Contaminación Obtenidos Para los Diez Puntos de Muestreo	82
5.13.- Rangos de los Factores de Contaminación	83
5.14.- Rango para el Grado de Contaminación	83
5.15.- Factor Potencial de Riesgo Ecológico	84
5.16.- Niveles de Contaminación de Acuerdo a los Valores del Factor Potencial de Riesgo Ecológico	84
5.17.- Índices de Contaminación Calculados	85
5.18.- Factor de Movilidad de Metales Tóxicos	87
5.19.- Estadística Descriptiva de los Metales por Cada Fracción del Método BCR.....	89
5.20.- Matriz de Correlación de Spearman de los metales por Cada Fracción del Método BCR	90
5.21.- Componentes Principales o Factores de los Metales por Cada Fracción del Método BCR	92
5.22.- Estadística Descriptiva por Zona de Estudio por Cada Fracción del Método BCR	96
5.23.- Matriz de Correlación de Spearman, entre Fracciones de Cada Punto de Muestreo....	98
5.24.- Componentes Principales o Factores por Zona de Estudio y por Cada Fracción del Método BCR	100

Índice de Gráficas

página

4.1.- Aforo Vehicular por Zona de Estudio en la Avenida Paseo de la Reforma.....	42
4.2.- Clase Granulométrica de la Glorieta Cuitláhuac	44
4.3.- Clase Granulométrica de la Glorieta San Martín	44
4.4.- Clase Granulométrica de la Glorieta Simón Bolívar	44
4.5.- Clase Granulométrica de la Glorieta Globo	44
4.6.- Clase Granulométrica de la Glorieta Colón	44
4.7.- Clase Granulométrica de la Glorieta Cuauhtémoc	44
4.8.- Clase Granulométrica de la Glorieta de la Palma	45
4.9.- Clase Granulométrica de la Glorieta del Ángel	45
4.10.- Clase Granulométrica de la Glorieta de la Diana Cazadora	45
4.11.- Clase Granulométrica de la Glorieta de Fuentes de Petróleo	45
4.12.- Concentración Total de Hierro por Zona de Estudio	47
4.13.- Concentración Total de Cadmio por Zona de Estudio	48
4.14.- Concentración Total de Cobre por Zona de Estudio	49
4.15.- Concentración Total de Plomo por Zona de Estudio	50
4.16.- Concentración Total de Zinc por Zona de Estudio	51
4.17.- Concentración Total de Hierro por Tamaño de Partícula	56
4.18.- Concentración Total de Zinc por Tamaño de Partícula	57
4.19.- Concentración Total de Plomo por Tamaño de Partícula	58
4.20.- Concentración Total de Cobre por Tamaño de Partícula	59
4.21.- Concentración Total de Cadmio por Tamaño de Partícula	60
4.22.- Extracción Secuencial de Hierro	62
4.23.- Extracción Secuencial de Plomo	63
4.24.- Extracción Secuencial de Cadmio	65
4.25.- Extracción Secuencial de Cobre	66
4.26.- Extracción Secuencial de Zinc	68

5.1.- Biplot de Correlaciones de Metales Tóxicos y de los Sitios de Estudio	72
5.2.- Biplot de Correlaciones de Metales Tóxicos, Sitios de Estudio y Flujo vehicular Total ..	76
5.3.- Factor de Movilidad de Metales Tóxicos	87
5.4.- Biplot de Correlaciones de Metales Tóxicos, Sitios de Estudio y Fracciones de la Extracción del Método BCR	95
5.5.- Biplot de Correlaciones de Metales Tóxicos, Sitios de Estudio y Metales Totales por el Método BCR	102

Índice de Figuras

Página

2.1.- Fuentes de Metales Tóxicos Relacionas con Automóviles	6
2.2.- Simulación de la Movilidad de los Metales en Polvos en el Aparato Digestivo	25
3.1.- Diagrama General de Flujo	31
3.2.- Recolección de los 10 Puntos de Muestreo	32
3.3.- Zona de Estudio Paseo de la Reforma	33
3.4.- Tamaño de Grano para el Tamizado de Partículas	35
3.5.- Diagrama de Flujo de Digestión de Metales Totales	37
3.6.- Diagrama de Flujo del Método de Extracción Secuencial BCR	40
5.1.- Plano Canónico Entre Metales Totales, con una Distribución de Varianza (71.88 %) de los Factores F1 y F2	72
5.2.- Plano Canónico Entre Metales Totales y Flujo Vehicular Total con una Distribución de Varianza (70.92 %) de los Factores F1 y F2	76
5.3.- Plano Canónico Entre Metales Tóxicos y las Fracciones del Método BCR, con una Distribución de la Varianza (51.16 %) de los Factores F1 y F2	93
5.4.- Plano Canónico Entre Metales Tóxicos y las Fracciones del Método BCR, con una Distribución de Varianza (28.13 %) de los Factores F3 y F4	94
5.5.- Plano Canónico Entre Fracciones del Método BCR y Sitios de Muestreo, con una Distribución de Varianza (94.01 %) de los Factores F1 y F2	100

1.- Introducción.

La contaminación de suelos por metales ha sido llevada a cabo desde tiempos remotos, desde minerales medianamente trabajados para fabricar herramientas y armas hasta la moderna metalurgia junto con la extracción de recursos energéticos, especialmente del petróleo.

Consiguiendo que los metales se encuentren presentes en toda la vida cotidiana, acumulando sus residuos que puede causar daños a los ecosistemas naturales, a las tierras de cultivo y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S, entre otros.

Asimismo, el material residual puede emitir partículas de dimensiones micrométricas, que son fácilmente transportables por el viento o arrastradas por las corrientes de agua movilizándolas a grandes distancias y causar problemas en la salud de poblaciones (Sepúlveda, *et al.*, 2005).

El estudio de metales contenidos en polvos es particularmente importante debido a la gran cantidad de vehículos que circulan diariamente, el número de industrias emisoras, la erosión de la capa de recubrimiento de las calles, actividades humanas, etc. Estas partículas suelen incluir metales no esenciales como el plomo y cadmio que pueden ser tóxicos incluso a niveles muy bajos para el ser humano y elementos biológicamente esenciales, tales como cobre y el zinc, lo que podría causar efectos tóxicos a elevadas concentraciones (Nasser y Inas, 2012).

Las partículas urbanas pueden ser emitidas directamente a la atmosfera a través de los procesos de combustión y se considera que el tráfico vehicular es una de las principales fuentes de los contaminantes particulados. La mayor parte de estos contaminantes tienden agregarse en la parte superior del suelo. Las partículas más finas pueden viajar grandes distancias y contaminar lugares alejados de la zona de donde son emitidas por fenómenos meteorológicos como el viento y la lluvia, los cuales tienen una influencia fundamental en la dispersión de estas partículas contaminadas (Han, *et al.*, 2008).

Los daños que causan son tan severos que las autoridades ambientales a nivel mundial ponen mucha atención en minimizar la exposición de la población, en particular a la población infantil, ya que en este caso, la ingestión accidental es el resultado de la actividad normal de los niños de llevarse las manos a la boca o de ingerir directamente partículas del suelo por causa de la introducción de objetos. Además, los niños tienen una mayor tasa de absorción de metales tóxicos procedentes de la digestión (Ruby, *et al.*, 1993).

La presencia prolongada de metales tóxicos en el medio ambiente puede ser peligroso para la salud humana provocando problemas en el sistema cardiovascular, respiratorio, inmunológico, neurológico, gastrointestinal, a la piel y riñones por causa de la inhalación, ingestión y contacto dérmico. Los metales no son biodegradables y pueden acumularse en los suelos provocando alteraciones sobre los ciclos biogeoquímicos (Boyd, *et al.*, 1999).

El presente estudio se realizó una simulación del tracto gastrointestinal, se cuantificaron las concentraciones de metales totales y por tamaño de partícula de cinco metales tóxicos (Cu, Cd, Zn, Fe y Pb). Para evaluar el grado de contaminación se calcularon los índices y factores de contaminación, asociados a los polvos recolectados en una avenida de alto aforo vehicular, con el objeto de identificar la presencia de sustancias contaminantes, no monitoreadas constantemente, como son los metales tóxicos.

1.1.-Justificación.

Los metales tóxicos son actualmente una problemática tanto en materia ambiental como de salud pública, las concentraciones de metales tóxicos en polvos en zonas urbanas se hicieron más severas debido a la rápida urbanización, el alto aforo vehicular, al mal estado en que se encuentran las avenidas y a la forma y tipo de material empleado para dar mantenimiento a las calles, cada vez hay mayor preocupación debido a su toxicidad, el viento suspende una cantidad importante de polvo el cual puede ser ingerido o inhalado por los seres humanos, estos polvos contaminan los alimentos que se consumen en la calle (Fenger, 1999; Gibson y Farmer, 1986).

En tiempo de lluvias, estos polvos son arrastrados por el agua hacia los drenajes en donde se depositan o mezclan con aguas residuales y de esta forma terminan en los campos de riego o en estaciones de tratamiento, donde pueden causar contaminación de suelos, contaminación de productos agrícolas o bien perturbar el funcionamiento de las plantas de tratamiento. Cuando estos metales son ingeridos, inhalados o absorbidos, resultan ser altamente tóxicos para los seres vivos en general y para los humanos en particular (Elsa, 2012).

Es importante recordar que los metales tóxicos pueden transformarse pero no degradarse, además los metales como el Pd, Cd, Zn y Mn se caracterizan por su alto grado de toxicidad y persistencia (Albert, 1997). Para que los metales tóxicos puedan ejercer su toxicidad sobre un ser vivo deben de encontrarse disponibles para ser captados por éste, es decir que el metal debe estar biodisponible.

Hasta este momento, no se ha conseguido tener una Norma Oficial Mexicana que se centre en especificar los límites máximos permitidos de exposición a los polvos que contengan metales potencialmente tóxicos, así como un método para cuantificar los metales tóxicos que están biodisponibles por ingestión de materiales contaminados por ellos.

Se decidió hacer el muestreo en la avenida Paseo de la Reforma de la ciudad de México, debido a que existen muy pocos estudios sobre los metales tóxicos asociados a los polvos y debido a la gran cantidad de vehículos de motor que circulan diariamente, es una de las avenidas más importantes y una de las más transitadas por la gente.

1.2.- Hipótesis.

Los metales tóxicos como Pd, Cd, Zn y Fe, asociados a los polvos que contaminan las avenidas de las zonas urbanas de la ciudad de México con alta afluencia de vehículos de motor, son generados diariamente por el desgaste de piezas de automóviles, por la ineficiente combustión de sus combustibles y por el mal estado en que se encuentran las avenidas. Por lo cual, la cuantificación de la concentración de esos metales tóxicos, la determinación de su movilidad, biodisponibilidad y procesamiento gastrointestinal, proporcionarán valores indicadores del riesgo que representan para los ecosistemas y del efecto nocivo con el que pueden afectar la salud humana.

Por otra parte, se esperaría que la mayor concentración de estos metales se localice en la zona con mayor densidad de población humana, tráfico vehicular y comercios, (hacia el centro histórico) y menores concentraciones hacia la zona con menor densidad de población, menor tráfico vehicular y menor cantidad de comercios (hacia el bosque de Chapultepec).

1.3.- Objetivos.

1.3.1 Objetivo General.

Evaluar la movilidad gastrointestinal, la concentración y comparar valores indicadores del riesgo que representan para los ecosistemas y para la salud humana, de los metales tóxicos que se encuentran asociados a los polvos depositados a lo largo de una avenida de alto aforo vehicular.

1.3.2 Objetivos Específicos.

- Comparar los diez sitios de muestreo, mediante sus concentraciones de los metales tóxicos Pb, Cd, Zn, Cu y Fe en polvos recolectados de una avenida de alto aforo vehicular.
- Determinar los índices de contaminación (factor de enriquecimiento, índice de geoacumulación, el factor de contaminación, grado de contaminación, factor de movilidad y el factor potencial de riesgo ecológico) de las muestras recolectadas.
- Determinar la movilidad de los contaminantes tóxicos utilizando el método de extracción secuencial (BCR).
- Establecer la relación entre la concentración de los contaminantes particulados, el aforo vehicular y sitios de muestreo.

2.- Estado del Arte

2.1.- Principales Fuentes de Metales Tóxicos.

El ambiente de las calles urbanas representa un sistema muy complejo en términos de acumulación, para el caso de los metales tóxicos. El nivel de metales tóxicos en cada compartimento ambiental está en función de muchas variables incluyendo la intensidad y naturaleza de las fuentes que los aportan, la forma química del metal, deposición y proceso de resuspensión, condiciones hidrometeorológicas y prácticas de limpieza municipal de las calles (Revitt, *et al.*, 1990).

El contenido de metales en los polvos sedimentados de la calle puede derivarse de dos orígenes: natural y antropogénico.

La principal fuente natural de los metales tóxicos son las erupciones volcánicas; durante estos procesos una gran cantidad de metales se incorporan a la atmósfera, después estos metales son dispersados por los vientos. De esta forma se depositan en la superficie del suelo o bien son arrastrados por las aguas de lluvia hacia los ríos, lagos y océanos. Otro mecanismo natural de contaminación se lleva a cabo cuando las corrientes de agua superficiales o subterráneas pasan por las vetas en donde se encuentran los minerales, siendo transportados éstos en forma disuelta o bien en diversos tamaños de partículas (Hernández, 2002).

El suelo se pierde por causa de la erosión eólica de terrenos y caminos (pavimentados y no pavimentados) y está en función de la velocidad del viento, así como de la cobertura vegetal característica del terreno del área expuesta. Esta pérdida de material se manifiesta en forma de emisiones instantáneas de material particulado fino que se suspende en la atmósfera y se traslada a grandes distancias, y por su tamaño puede formar parte de la fracción respirable (Hernández, 2002).

El contenido de metales tóxicos en suelos, debería ser únicamente función de la composición del material original y de los procesos edafogenéticos que dan lugar al suelo. Pero la actividad humana incrementa el contenido de estos metales en el suelo en cantidades considerables, siendo ésta, sin duda, la causa más frecuente de las concentraciones tóxicas.

Las fuentes antropogénicas de metales tóxicos en polvos en vías urbanas son generadas por partículas de escape vehicular, partículas de desgaste de neumáticos, desgaste de piezas, combustión de gasolina y diésel (Flores, *et al.*, 1998), el desgaste de los materiales de recubrimiento de las avenidas, emisiones industriales, lubricantes de aceites, materiales impermeables, corrosión de materiales de construcción y de aerosoles. (Morton-Bermea, *et al.*, 2009, Wei, *et al.*, 2003, Takada, *et al.*, 1991).

Morrison (1985) ha encontrado que las fuentes de metales tóxicos en superficies urbanas relacionadas con los automóviles son las que se muestran en la figura 2.1.

Plomo	Cadmio	Zinc
<ul style="list-style-type: none"> • Antidetonante en las gasolinas • Partes corroídas del auto • Aceite de motor <ul style="list-style-type: none"> • Llantas • Frenos • Pintura • Pinturas anticorrosivas • Pavimento • Aditivos de petróleo 	<ul style="list-style-type: none"> • Llantas • Aceites de motor • Partes corroídas de motor • Batería de auto • Partículas de mofle <ul style="list-style-type: none"> • Pavimento • Químicos de tratamiento de agua • Conservadores de madera • Galvanizado de piezas 	<ul style="list-style-type: none"> • Llantas • Aceite de motor • Fluidos de transmisión automática • Frenos • Partículas de mofle • Partes corroídas del auto • Anticongelante • Pavimento • Materiales de construcción • Pinturas

Figura 2.1. Fuentes de Metales Tóxicos Relacionadas con Automóviles (Morrison, 1985).

2.2.-Deposición Atmosférica.

La deposición atmosférica es la manera de algunos contaminantes presentes en el aire puedan precipitar sobre la superficie terrestre (suelos, plantas, pavimentos etc.).

Los metales generalmente llevan a cabo su deposición en forma de partículas, pero también es frecuente encontrarlos en forma de aerosoles. La forma en que se lleva a cabo la deposición es básicamente por dos vías: la deposición húmeda y la deposición seca.

La deposición seca se presenta cuando las partículas caen hacia la superficie por la acción de la fuerza de gravedad o por la ayuda del viento. Los cuerpos receptores pueden ser cualquier superficie del suelo. Estos metales una vez caídos en esta superficie, pueden mezclarse con el polvo y con agua de lluvia, representando un riesgo latente para la salud (Hernández, 2002).

La deposición húmeda se presenta cuando las partículas en su curso de su estancia atmosférica se ponen en contacto con moléculas de agua y éstas pueden fijarse con los metales. Estos metales, con un tamaño tal que no se han podido depositar en el suelo, pueden dirigirse hacia las nubes y estar contenidos en éstas hasta que se produzca la precipitación pluvial, los metales contenidos en la nube caerán en forma de gotas hacia la superficie del suelo (Hernández, 2002).

De esta manera, una nube puede facilitar el transporte de los metales traza hacia lugares más distantes y en un tiempo menor a que si estuvieran sólo en formas de partículas suspendidas (Flores, *et al.*, 1988).

2.3.- Metales en Polvos Urbanos.

El polvo son partículas sólidas, las cuales forman partes del suelo, compuesta por metales tóxicos provenientes de fuentes antropogénicas y materia orgánica. Estas partículas pueden variar su tamaño en 1 a 1000 micrómetros (Ferreira B. L. y De Miguel, 2005). El polvo se acumula en la superficie del suelo y fácilmente es suspendido en la atmósfera por el viento, esta distribución es altamente heterogénea y varía con la localización geográfica, el clima local, estación del año, el tránsito de vehículos, la intensidad de los vientos y el diámetro de la partícula (Bhatnagar, 2004).

El tamaño de partícula es la característica más importante para determinar sus propiedades ópticas y de deposición, además de su tiempo de vida media en la atmósfera. Así como los efectos ambientales y de salud pública, dependen de éste patrón de distribución (Husar, 1996).

La fracción gruesa tiende a ser más variable en el espacio y en el tiempo. Las partículas resultan principalmente de procesos mecánicos tales como la fricción. Incluyen las cenizas que se producen durante la combustión de carbón; el polvo industrial o el polvo de cemento. Su tiempo de residencia en la atmósfera es generalmente menor que un día (de minutos a horas), la distancia típica de transporte es de sólo unos cuantos kilómetros (Buonicore, *et al.*, 1992).

La fracción de partículas finas es prácticamente de origen secundario y su patrón espacio temporal es más regional. Una gran proporción se forma por reacción química dentro de la atmósfera. Se estima que están formadas por sulfatos, nitratos, ion amonio e hidrógeno, carbón elemental, metales y diversos compuestos orgánicos. Su vida media es de días a semanas y viajan de cientos a miles de kilómetros (Nathanson, 1997; Buonicore, *et al.*, 1992).

La fracción de partículas que puede ser inhaladas por el aparato respiratorio del ser humano depende de las propiedades de las partículas, de la velocidad y dirección del aire, de la frecuencia respiratoria y de la forma de respiración por la nariz o por la boca. La porción inhalada puede depositarse en el tracto respiratorio o exhalarse, esto varía de persona a persona. El criterio adoptado por la Organización Internacional de Normalización (ISO), ha establecido algunas definiciones para las fracciones de partículas suspendidas totales, fracción inhalable, extratorácica, torácica, traqueobronquial y respirable. Estas fracciones comprenden el porcentaje de masa de partículas que puede penetrar en regiones específicas del tracto respiratorio; las que miden más de 10 μm se retienen básicamente en las vías respiratorias superiores y las <10 μm predominan en la fracción respirable, ha resultado de singular importancia ya que se aplica en la determinación de la región de afectación del sistema respiratorio. Actualmente el tamaño de las partículas inhaladas determina la zona del tracto respiratorio donde pueden depositarse (UNEP/WHO, 1994).

Las partículas cuyo tamaño se encuentran entre 250 y 220 micrómetros son aquellas que fácilmente son transportadas por el viento y arrastradas por las aguas de escurrimiento en tiempos de lluvia hacia el drenaje (Flores *et al.*, 1998; Ellis *et al.*, 1982).

Las partículas cuyo tamaño es menor a 200 micrómetros son aquellas que ingresan más fácilmente al ser humano y principalmente a los niños por vía de exposición oral (Gasser, *et al.*, 1996; Ruby, *et al.*, 1996; Flores, *et al.*, 1998).

Los metales tóxicos, pueden acumularse en suelos por deposición atmosférica y por diversas fuentes antropogénicas contribuyendo al potencial tóxico del medio, al suelo se le ha reconocido como un depósito de contaminantes. Los metales tóxicos son ingeridos por los organismos lo incorporan a sus tejidos y lo transportan a todos los eslabones de la cadena alimenticia incluyendo al hombre. La toxicidad de los metales tóxicos es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos, un metal disuelto en forma iónica es absorbido más fácilmente que cuando se encuentra en su forma elemental. Las posibilidades de su oxidación y retención por los diversos órganos aumenta si éstos se hallan en forma reducida (Flores, 1992).

Las partículas contaminadas con metales tóxicos pueden ser peligrosas para el ser humano, un caso muy particular es cuando los niños se impregnan las manos con estos polvos y después se llevan las manos a la boca o algún juguete, así ingiriendo polvo con elevadas concentraciones de metales tóxicos (Van Wijnen, *et al.*, 1990; Calabrese, *et al.*, 1989; Davis y Waller, 1990). La agencia para la protección del ambiente de los Estados Unidos (US EPA) calcula en 0.135 g/ día para niños de 2 a 3 años (US EPA, 1994) y supone que el 95% de los niños de esa edad ingieren 200 mg de polvo por día o menos; el peor escenario es el de los niños que ingieren partículas de suelo intencionalmente, lo que se conoce como “pica”, ya que estos

niños pueden ingerir hasta 10 g de sólidos al día (Ruby, *et al.*, 1993, Calabrese, *et al.*, 1989).

Por la vía de ingestión se encuentran el mayor riesgo de ingerir partículas contaminadas con metales tóxicos, ya que las condiciones gastrointestinales cambian en el trayecto, modificando la naturaleza química del metal tóxico, causando su movilización al organismo.

La ingestión puede variar debido a los hábitos de higiene y limpieza personal ya que al depositarse el polvo, puede caer sobre los alimentos y si éstos no son cubiertos o manipulados de manera adecuada, pueden ser una fuente de exposición. No lavarse las manos antes de comer y transportar el polvo contaminado pegado en la piel, son causas adicionales de exposición.

En época de lluvia, las partículas se encuentran dispersas en el ambiente urbano. Estos sólidos son arrastrados por las aguas de escurrimiento y a través del drenaje, pueden llegar a los cuerpos de agua, contaminando los sedimentos e incrementando su contenido en los sólidos en suspensión (Mullis y Bussy, 1992), poniendo en riesgo a la fauna y la flora acuática.

La determinación de los niveles de contaminación por metales en suelos y polvos, es necesario para vigilar la contaminación del ambiente dado que estos niveles pueden afectar a los ecosistemas y estos metales tóxicos pueden acumularse en los organismos. Existen diversas formas de evaluar la contaminación en polvos por metales, siendo la más sencilla el análisis de la concentración total después de una digestión ácida (Welte, *et al.*, 1980). Sin embargo este método no diferencia la parte natural de la parte antropogénica del metal, ya que no se puede determinar qué porcentaje liberado del metal es parte antropogénica o natural.

El interés en los niveles de concentración por metales tóxicos asociados con polvos urbanos ha aumentado en las últimas décadas, se han realizado estudios de metales tóxicos en calles, parques, carreteras, techos, estacionamientos y zonas industriales, dichos estudios han reportado amplias variaciones en las concentraciones de los metales tóxicos que se encuentran en los polvos y suelos. Los estudios de metales tóxicos en polvos han demostrado que existen concentraciones importantes de estas sustancias en la atmósfera (Aldape *et al.*, 1996). Sin embargo el comportamiento de los metales particulados en la atmósfera está muy poco estudiado. Flores (1999) ha reportado concentraciones elevadas de plomo, zinc y cadmio en polvos de la calle de la Ciudad de México. Se han determinado altas concentraciones de plomo, zinc, cadmio y cobre en polvos depositados en calles, avenidas y estacionamientos (Harrison, *et al.*, 1984; Hamilton *et al.*, 1984, Beckwith *et al.*, 1986).

Charlesworth (2003) realizó un estudio de la distribución de metales tóxicos en polvos viales de dos ciudades de Inglaterra. La primera ciudad, Birmingham, es una gran área urbana (con una población de 2.3 millones de habitantes), la segunda

Ciudad Coventry es más pequeña (con una población de 0.3 millones de habitantes). En Birmingham, se identificaron varias tendencias, como las concentraciones más altas en zonas industriales y sobre el periférico y concentraciones más bajas en zonas residenciales y parques. Se identificaron valores altos, asociados con cruces regulados por semáforos, en donde los vehículos pasaban con más regularidad. En Coventry, las concentraciones de metales tóxicos en las intersecciones controladas por semáforos fueron menores que las encontradas en la Ciudad de Birmingham.

Barco (2012) realizó un estudio de la distribución de metales en polvos recolectados en avenidas de alto aforo vehicular que cruzan el eje 5 de la Ciudad de México, las muestras recolectadas se analizaron después de someterlas a una digestión ácida y determinó la concentración total de metales tóxicos, los cuales siguieron el orden: $Fe > Pb > Zn > Cu > Cr > Cd$ en todos los sitios de muestreo. Evaluó la movilidad de los metales, empleando el método de especiación química BCR, observando que la mayor concentración de Fe y Cr se localizaron en la fracción residual; la concentración de Cu más alta se localizó en la fracción oxidable; la concentración más alta de Pb se observó en la fracción residual, fracción oxidable y fracción reducible, mientras que el Zn se encuentra más homogenizado en las cuatro fracciones.

Se han realizado estudios sobre las concentraciones de metales tóxicos en polvos en las carreteras principales del Cairo, Egipto (Nasser y Inas, 2012), evaluaron los niveles tóxicos en polvos mediante los factores: de contaminación (Cf), el grado de contaminación (Cd) el índice de geo-acumulación (I_{geo}), el factor de riesgo ecológico (Er) y el potencial de índice de riesgo ecológico (Ri). El factor de contaminación (Cf) reveló que el polvo de camino tiene niveles altos de Pb, Zn, Cd. El índice de I_{geo} indicó que existe una moderada contaminación por Pb, Zn y Cd debido principalmente por actividades vehiculares e industriales. El potencial de riesgo ecológico (Ri) indica que el Cairo sufre por contaminación de metales tóxicos por Pb y Cd.

Tamrakar y Shakya (2011) realizaron un estudio de metales tóxicos en polvos en las calles de la ciudad metropolitana en Kathmandu. El estudio se llevó a cabo en cuatro sitios de muestreo en diferentes localidades de la ciudad metropolitana con diferentes actividades, tales como talleres mecánicos, parques, áreas de mercado y áreas residenciales, analizaron los siguientes metales: Zn, Pb, Ni, Cr, y Cd por el método espectrofotométrico (absorción atómica). Los resultados mostraron que el Zn es el elemento más disponible y las muestras de polvo de la calle contienen niveles significativos de Zn, Pb, Ni, Cr, Cd.

Se han realizado estudios en los polvos de las calles de los suburbios de Londres (Harrison, *et al.*, 1981; Hamilton, *et al.*, 1984) y se han encontrado concentraciones importantes de Pb, Zn y Cd. También se han hecho estudios en polvos en calles

cercanas a las industrias ferrosas y no ferrosas y se han detectados altas concentraciones de metales tóxicos (Maskall y Thornton, 1998; Sobanska, *et al.*, 1999).

En la ciudad de Bhilai (India) se realizaron estudios de la distribución de metales tóxicos en polvos de Hg, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb y Zn, de los camino situado cerca de la Planta de Acero de Bhilai, en donde el total de las concentraciones de Zn, Mn y Pb excedió el nivel de contaminación del suelo en comparación con los valores de un sitio de control. Por lo que al final los resultados indicaron que las concentraciones de metales en el polvo de las calles fueron generalmente altas Zn>Mn>Pb>Cu>Cr>As>Co>Hg (Ambade, 2010).

2.4.- Toxicidad de los Metales Pesados.

La toxicidad es la capacidad intrínseca de una sustancia para causar un efecto adverso a un organismo (Gutiérrez y Fortoul, 1997). Para evaluar de manera cuantitativa se requiere conocer la cantidad de sustancia en la que fue expuesto, la cantidad absorbida, la vía de exposición y la frecuencia en la que fue expuesto. Otros factores pero estos relacionados con el ser humano, es la genética, la edad, y el estado nutricional.

Las vías de exposición son aquellas rutas por las cuales un organismo entra en contacto con un agente externo, y dependiendo de la vía de exposición el tóxico puede ser modificado, biotransformado o activado (Gutiérrez y Fortoul, 1997). Después de la absorción los metales tóxicos pueden acumularse, excretarse o transformarse, dependiendo de la vía de exposición.

La peligrosidad de los metales tóxicos radica en las concentraciones elevadas, tienen a bioacumularse y no puede ser degradados o destruidos.

A continuación se menciona la información correspondiente a los metales analizados en este estudio, así como algunos efectos que estos metales provocan sobre la salud:

2.4.1.- Cadmio.

El cadmio es un elemento relativamente raro, se encuentra ampliamente distribuido en la corteza terrestre en una concentración promedio de 0.1 mg/kg a 2.0 mg/kg. Aunque su presencia natural es baja, su prolongada vida media es de 10-30 años y su capacidad de bioacumulación lo hacen un importante agente de contaminación ambiental (Albert, 2004).

La actividad volcánica es la mayor fuente natural de liberación de cadmio a la atmosfera. Se ha calculado que el incremento anual debido a esta fuente es de entre 100 y 500 toneladas.

El cadmio que entra al ambiente es sobre todo de origen antropogénico, en general, las dos fuentes principales son: la producción y el uso del cadmio, como la minero metalurgia de metales no ferrosos, la metalurgia del hierro y acero, la fabricación de fertilizantes fosfatados, la incineración de residuos de madera, carbón o plásticos, la combustión de aceite o gasolina y las aplicaciones industriales del cadmio (Albert, 2004).

Otras fuentes de contaminación ambiental por cadmio son: las partículas de polvo de caucho provenientes de las ruedas de automóvil, de la galvanización con zinc de tuberías y plásticos que contienen pigmentos coloreados de cadmio. Los fumadores pueden absorber cantidades comparables a la ingestión diaria normal con la dieta (IDD), es decir, inhalan 0.1 a 0.2 mg de cadmio por cigarrillo, con una absorción aproximada del 50%. Por esto, los fumadores deben formar un grupo especial, cuando se investiga exposición de cadmio (Levy BS, *et al.*, 1998 y Ellis *et al.*, 1979).

Este elemento, al igual que el plomo, se transfieren de un lugar a otro a través de los procesos físicos como el viento, la erosión y los procesos biológicos; además, esta transferencia se ve afectada por la intervención del hombre.

El cadmio y sus compuestos pueden movilizarse a través del suelo, pero su movilidad depende de varios factores tales como el pH y la cantidad de materia orgánica. Generalmente, el cadmio se adhiere fuertemente a la materia orgánica en la cual permanece inmóvil en el suelo y puede ser incorporado por plantas o animales, entrando así a la cadena alimentaria. El cadmio llega a suelos de terrenos agrícolas por deposición aérea (41%), por fertilizantes fosfatados (54%), por aplicación de abono de estiércol (5%). Se ha encontrado que, en suelos contaminados, los niveles de cadmio alcanzan valores de hasta 1 mg/kg (ATSDR, 2012).

2.4.2.- Toxicocinética del Cadmio.

La absorción del cadmio ocurre generalmente a través de dos vías: la primera de ellas es oral, por la ingestión de alimentos por medio de los vegetales y productos animales, los frutos y semillas contienen menos cadmio que las hojas, el pescado, los crustáceos, el riñón e hígado de animales acumulan cadmio en grado relativamente elevado. La segunda vía de absorción es la respiratoria, principalmente en forma de aerosol (va a depender del tamaño de partícula, su composición química y su concentración), entre el 10 y el 50% de las partículas de cadmio que son inhaladas, se depositan en la parte alveolar de los pulmones y pueden pasar a la sangre, ya sea directamente o por vía del macrófago alveolar (Vuori *et al.*, 1979).

Independientemente de la vía de absorción, el riñón es el principal órgano crítico para el cadmio. La acumulación del cadmio en riñón e hígado depende de la intensidad, el tiempo de exposición y del estado óptimo de la función de excreción renal. En ambos casos se ha encontrado incremento con la edad. En una sobreexposición, a largo plazo puede alcanzar concentraciones muy elevadas en el hígado (Oleru UG y Kidney, 1976).

En el hígado se une a una proteína de bajo peso molecular la metalotioneína, pequeñas cantidades de ese complejo proteína cadmio pasan continuamente del hígado al torrente sanguíneo para ser transportado a los riñones y filtrado a través de los glomérulos y posteriormente ser reabsorbido y almacenado en las células tubulares del riñón. La función principal de esta micro proteína es la protección del sistema enzimático celular, aunque se le ha descrito otra función, la cual es de unirse específicamente al cadmio y a otros metales tóxicos (Lauwerys, 1986).

En la sangre encontramos aproximadamente 0.06% del contenido corporal de cadmio y más del 50% está en los hematíes unido inestablemente a una pseudoproteína. El aclaramiento sanguíneo del cadmio es rápido, se acumula principalmente en el riñón y en adultos no expuestos llega a valores entre 7.4 y 8.8 mg, lo que representa entre 30% y 50% de su contenido corporal.

En condiciones normales de distribución el cadmio absorbido se excreta principalmente por orina y en menor cantidad por la bilis, aunque pequeñas porciones puedan eliminarse con sudor, pelo y por secreción gastrointestinal (Kjellstrom y Nordberg, 1978).

2.4.3.- Hierro.

El hierro se considera el metal más útil no sólo por su abundancia, sino por la facilidad con que puede cambiar sus características, por su agregación de cantidades variables de otros elementos y por la modificación de su estructura cristalina mediante temple y revenido, también considerado un elemento esencial para la vida y su alto potencial tóxico. El hierro alterna fácilmente entre las formas férrica (Fe^{3+}) y ferrosa (Fe^{2+}) al liberar o captar un electrón. Esto le permite al hierro catalizar reacciones que generan radicales libres muy reactivos, tales como OH^- y O_2 , que en concentraciones adecuadas causan un daño celular (Kushner, *et al.*, 2001).

La fuente industrial más significativa de residuos solubles de hierro, es la que se desecha de las soluciones desoxidantes, en los baños desoxidantes que se emplean para remover el óxido que se le forma al hierro o al acero y a los proceso de niquelado de otros metales en su superficie.

2.4.4.- Toxicocinética del Hierro.

La gravedad de la intoxicación por hierro está relacionada con la cantidad de hierro elemental ingerida. La ingestión de una cantidad de hierro elemental inferior a 20 mg/kg de peso corporal no suele tener ningún efecto tóxico. Una dosis entre 20 y 40 mg/kg de peso produce toxicidad gastrointestinal, intoxicaciones moderadas a severas ocurren con ingestiones entre 40 y 60 mg/kg. Más de 60 mg/kg puede llegar a producir toxicidad letal (Elsa, 2012).

La acidez gástrica es necesaria para mantener el hierro en su estado soluble (hierro ferroso), forma en la que se absorbe a través de la mucosa duodenal y yeyunal. Dentro de las células epiteliales del intestino se oxida al hierro férrico y se une a la ferritina, posteriormente se libera lentamente, desde la ferritina, hacia el plasma, donde se une a la transferrina, una globulina específica para transportar al hierro. Cuando esta proteína se satura (lo que suele ocurrir por encima de los 3 mg/L de hierro en plasma), el hierro pasa a la sangre en forma libre, esta forma es la realmente tóxica. Una determinación muy importante es la capacidad de fijación del hierro por la transferrina; esta capacidad representa la cantidad de hierro que puede unirse a la transferrina, sin que quede hierro libre (Bellot, 2010).

El hígado puede afectarse en caso de intoxicación grave. La lesión puede oscilar entre una ligera inflamación y una necrosis masiva. En casos de lesión importante aparecerá la conocida clínica de fallo hepático, con sus manifestaciones neurológicas de hipoglucemia y hemorragias. Estas manifestaciones aparecen tras un intervalo libre de más de 24 horas.

Sobre el SNC el efecto de la toxicidad por hierro es escaso y el estado de bajo nivel de conciencia se debe a la hipotensión, a la acidosis o al fallo hepático. De la misma forma, el shock y la acidosis, pueden llevar a afectación de cualquier órgano, pero especialmente al riñón, pulmón o páncreas (Bellot, 2010).

Sólo se elimina 1 mg de hierro al día en las heces (células epiteliales descamadas). La mujer en el periodo menstrual tiene pérdidas adicionales. Por tanto, una absorción de más de 2 mg/día de hierro lleva a una acumulación en las vísceras (Albert, 2004).

2.4.5.- Plomo.

El plomo es un constituyente natural del suelo y del polvo; es un contaminante permanente, por lo tanto es indestructible y no puede ser transformado a una forma inocua. El plomo se encuentra muy extendido en la naturaleza, tanto por ser un elemento natural, y por las emisiones antropogénicas derivadas de las actividades humanas. Su disposición no conoce límites geográficos y puede contaminar áreas muy lejanas al sitio original de emisión (Albert, 1990).

Sus estados de oxidación son 0, +2, +4 y su número de valencia generalmente es 2, pero también reacciona con valencia 4, sobre todo en compuestos orgánicos, forma aleaciones con muchos metales, tales como el estaño, cobre, arsénico, bismuto, cadmio y sodio. El plomo es un elemento especialmente importante debido a su amplia utilización en una gran variedad de procesos industriales (Albert, 1990).

De manera natural, está ampliamente distribuido en la corteza terrestre, en mayor cantidad en los estratos profundos y en menor proporción en la superficie, los mantos acuíferos no contaminados tienen pequeñas cantidades de este metal. Su presencia en los seres vivos se debe a que las plantas lo absorben a través de la raíz, y a su vez, los animales lo hacen al alimentarse (Albert, 2004).

En la actualidad, el plomo se utiliza principalmente en la producción de acumuladores, bacterias, pigmentos, en hojas metálicas, cubiertas para proteger de los rayos X, en la fabricación de tubos y en soldaduras.

En suelos rurales las concentraciones de este elemento varían de 2 a 200 $\mu\text{g/g}$, mientras que en suelos urbanos, la concentración de plomo llega a ser extremadamente elevadas. En ocasiones, por ejemplo el contenido medio de plomo en las calles de algunas zonas residenciales y comerciales llega a ser de 1600 a 2400 $\mu\text{g/g}$, presentando un serio problema para la salud, en especial para los niños (Flores, 1992).

El plomo está presente en la dieta y en el ambiente del ser humano. Se ingiere unos 200 a 300 μg diarios sin que cause algún daño. En la sangre se han encontrado 10 a 35 μg por ml en poblaciones sanas. Las concentraciones sanguíneas aparecen más elevadas entre fumadores comparadas con los no fumadores, por el daño respiratorio inducido por el cigarrillo. El daño en el ser humano se centra en varios sistemas, siendo los más importantes los siguientes: nervios, hematopoyético, urinario, gastrointestinal, renal, reproductivo y endocrino (Albert, 1990).

Estas concentraciones también suelen ser elevadas en suelos cercanos a carreteras, industrias y fundidoras. Esto depende de la cantidad de plomo emitido, el tipo de vegetación, las condiciones atmosféricas como el viento, la lluvia y la profundidad del suelo (Albert, 1990).

Las plantas que crecen en los suelos contaminados por este elemento tienden a concentrarlo sobre todo en su sistema radicular. Las concentraciones se ha atribuido principalmente al plomo atmosférico. En la mayoría de los casos es poco soluble y se deposita en suelos y sedimentos o se une a la materia orgánica presente en ellos (Flores, 1992).

2.4.6.- Toxicocinética del Plomo.

El plomo penetra al organismo por tres vías: respiratoria, digestiva y cutánea, siendo esta última de escasa entidad (ATSDR, 1993). Por vía respiratoria es la más importante en el medio laboral. La absorción gastrointestinal del plomo es dependiente de la edad, estado fisiológico y nutricional, los adultos absorben cerca del 10 % del plomo ingerido y los niños absorben cerca del 50 % del plomo ingerido (Gerhardsson, *et al.*, 1995; Wittmers y Aufderheide, 1988).

El plomo que llega a la parte baja del aparato respiratorio, aproximadamente el 35 al 50 % pasa a la sangre y el resto se elimina. En este caso la absorción depende de factores tales como: el tamaño de la partícula inhalada, la forma química, el ritmo cardíaco, las características intrínsecas del organismo (Flores, 1992).

En el caso de baja exposición de plomo, existe un equilibrio entre el aporte del tóxico y la eliminación; pero, pasado un cierto nivel, comienza a acumularse. Este nivel depende no sólo del grado de exposición, sino también de la edad y de la integridad de órganos como el hígado y el riñón. El plomo se transporta por sangre y en un principio se distribuye uniformemente en todos los tejidos y órganos. Después, se redistribuye gradualmente en la sangre y tejidos blandos (Albert, 1990).

En la inhalación del plomo, según un modelo de dinámica pulmonar, un 35% del total del plomo inhalado sea este inorgánico u orgánico se deposita en la nasofaringe, la tranquea, los bronquios y los alvéolos. El mecanismo de acción es por unión a los grupos sulfhídricos y el resultado es negativo para las enzimas dependientes de zinc. La sintomatología por intoxicación de este metal es multisistémica ya que se presenta: dolor abdominal, astenia, irritabilidad, náusea, vómitos, pérdida de peso, cefalea, anemia, neuropatía periférica, ribete de Burton (puntos negruzcos o violáceos sobre las encías), entre otros (Valdivia, 2005).

El plomo es transportado en un 95 a 99 % por los hematíes, unido a la hemoglobina y otros compuestos. Se distribuye desigualmente en los tejidos del organismo; cerca del 10% del plomo es almacenado en los tejidos blandos (Berkowitz *et al.*, 1999). El plomo inorgánico se acumula en el organismo humano preferente en los huesos, luego se encuentra especialmente en el hígado, los riñones y los músculos estriados. Los compuestos orgánicos tales como el tetrametilo y el tetraetilo de plomo, tienden a acumularse en el hígado.

Se excreta fundamentalmente por orina (75 %) y de forma secundaria por heces, por las secreciones gastrointestinales (16%), por el cabello, uñas y sudor (8%) .El plomo también se elimina en la leche materna en concentraciones de hasta 12 mg/L (Flores, 1992).

4.4.7.- Cobre.

Su concentración promedio es aproximadamente 50 partes del cobre por ppm de suelo. El cobre es un metal de transición usado para la manufactura de muchos productos tales como amalgamas con diversas aplicaciones, agroquímicos (especialmente funguicidas y micostáticos), esmaltes y pigmentos, reactivos para curtiembre, alguicidas de uso profuso en cuerpos de agua dulce, entre otros.

Las fuentes de emisión del cobre son principalmente de dos tipos:

- Industriales como la metalurgia y la producción primaria de metales no ferrosos.
- Diversas fuentes como la combustión de gasolina y a incineración de desechos urbanos.

El cobre puede ser fácilmente moldeado, se encuentra presente en muchas mezclas de metales llamadas aleaciones como el bronce y el latón. Existen muchos compuestos de cobre en los que se incluye minerales naturales y químicos hechos por los hombres. El compuesto más comúnmente usado del cobre es el Sulfato de cobre (Albert, 1990).

Se encuentra naturalmente en plantas y animales, ya que es un elemento esencial para todas las formas de vida, una mínima concentración de cobre es esencial en el hombre, participa como catalizador en algunas reacciones y particularmente en la síntesis de la hemoglobina.

Los polvos de cobre que se liberan al aire y en el agua reaccionan con el oxígeno y con el azufre, que muchas veces son parte de los mismos minerales desde donde se refina el metal, generando compuestos aún más hidrosolubles y diseminables. El agua superficial que se contamina de esta manera puede drenar hacia los acuíferos y aumentar el nivel de cobre en ellos (Riedel, 2008) y por consiguiente en las redes de agua potable domiciliarias (Buchanan, *et al.*, 1999). Provocando casos de exposición aguda por la ingesta de líquidos contaminados con cobre, o por el consumo accidental, otro caso por exposiciones crónica, es debido al consumo diario de vegetales que han sido tratados con agroquímicos (Gunay, *et al.*, 2006).

2.4.8.- Toxicocinética del Cobre.

El cobre es un elemento común en el ambiente. Se está expuesto al cobre por el aire respirado, el agua potable, los alimentos y por contacto de la piel por el suelo, por el agua y la sustancias que contiene cobre, la absorción del cobre tiene lugar en el

intestino delgado, entrando en la superficie mucosa de las células por difusión facilitada, en el interior de las células intestinales capaces de absorber el cobre, los iones Cu^{+2} se encuentran unidos a la metalotioneína, a la que muestran una mayor afinidad que al zinc. El total, se absorbe entre el 25 a 60% del cobre aportado.

El cobre es transportado al hígado a través de la vena portal. En los hepatocitos, el cobre es captado por las metalotioneínas para su almacenamiento, se incorpora en varias cuproenzimas. Las metalotioneínas cargadas de cobre son almacenadas en los lisosomas de los hepatocitos, evitando de esta manera la toxicidad propia del metal libre ionizado. Cuando es necesario, el cobre es de nuevo incorporado a la ceruloplasmina y excretado al plasma. El cobre en exceso es eliminado por vía biliar y excretado en las heces (Elsa, 2012).

2.4.9.- Zinc.

El zinc es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza, ya que representa el 0.012% de la corteza terrestre, es un elemento esencial más abundante en el cuerpo humano, que forma parte de numerosos sistemas enzimáticos (Cornelis, *et al.*, 1993; González-Reimers, *et al.*, 1998).

El zinc es un elemento asociado al cadmio por sus propiedades químicas, contrariamente al plomo no proviene de un carburante sino de diversas fuentes como la combustión de carbón, humos provenientes de la combustión de diésel, de lubricantes y piezas de motores (Flores, 1992).

Está presente sobre todo en carnes, lácteos y cereales, pero se halla ampliamente distribuido en los alimentos. Este elemento metálico tiene muchos usos en la industria; un uso común es el recubrimiento del hierro y otros metales para evitar su corrosión o enmohecimiento, también es usado en la fabricación de baterías de celda seca y es mezclado con otros metales para formar aleaciones con el bronce o el latón (Honda, 1997).

Entre las funciones fisiológicas del zinc podemos referir: crecimiento celular, maduración sexual, infertilidad, mala visión nocturna, mala función inmunológica y pérdida del sentido del gusto como el del apetito (Fleming, 1988; Macready, 1998).

La ingestión recomendada de zinc varía en función de la edad, del sexo y de la situación fisiológica. Para un adulto se sitúa entre 12 a 15 mg/día. Durante la gestación y lactancia, las necesidades de zinc se elevan a 15 mg y 18 mg respectivamente (ATSDR, 1993).

2.4.10.- Toxicocinética del Zinc.

El zinc ingresa al cuerpo a través del trato digestivo cuando se ingiere por medio de alimentos o del agua potable. También puede penetrar por los pulmones si es inhalado en polvo o humo que contiene zinc y la cantidad de zinc que pasa a través de la piel es relativamente pequeña. Entre el 3 % y el 38 % del zinc de la dieta se absorbe por el tubo digestivo proximal. Su absorción disminuye con la ingestión simultánea de fibra vegetal, fitatos y cantidades elevadas de cobre o calcio. Esta absorción del Zn parece estar regulada por la síntesis de una proteína intestinal denominada metalotioneína (proteína de bajo peso molecular rica en cisteína que tiene la capacidad de ligar diferentes metales divalentes como el Zn, Cu y Cd) (Bremner y Beattie, 1990; Cousins, 1985; Koizumi, 1989).

El zinc liberado por las células intestinales en los capilares mesentéricos es transportado hasta el hígado, siendo la albúmina la proteína transportadora más importante, de forma que el 70% del zinc plasmático se encuentra unido a la albúmina y el resto a la alfa-2 macroglobulina, transferrina y algunos aminoácidos como cisteína e histidina (ATSDR, 1993-1).

La mayor parte del zinc es intracelular y se distribuye principalmente en los tejidos óseo y muscular (90%) y el resto, en la piel, el hígado, el páncreas, la retina, las células hemáticas y los tejidos gonadales en el varón. El zinc contenido en los hematíes, músculo, pelo y testículos se intercambia rápidamente y el zinc contenido en el esqueleto y dientes se moviliza muy lentamente (Favier y Hininger, 1997; González, 1996). La sangre contiene aproximadamente diez veces más zinc que el plasma, debido a la presencia de este catión en la enzima eritrocitario anhidrasa carbónica (ATSDR, 1993-1).

Se excreta por las heces a través de las secreciones pancreáticas e intestinales y en menor proporción por la orina (2%). Otras vías de excreción de zinc son a través del sudor, el pelo y la descamación de la piel (ATSDR, 1993-1).

2.5.- Índice de Geoacumulación (I_{geo}).

El índice de geocumulación es una medida para determinar la cantidad de carga o bioelementos admitida por un sedimento o un suelo y relaciona las cargas actuales con las cargas anteriores a la civilización (Müller, 1969).

Este índice, introducido por Müller (1979) con el objetivo de determinar en qué medida se extienden los metales trazas en suelos y sedimentos, ha sido empleado por varios autores (Chakrapani y Subramanian, 1990; Aikpokpodion, 2010); se calcula por medio de la ecuación (1):

$$I_{geo} = \log_2 (C_s / (1.5C_b)) \quad (1)$$

Donde C_s es la concentración del metal en estudio y C_b es el valor de referencia (de la Corteza terrestre), y el factor 1.5 sirve para minimizar las posibles variaciones en los valores básicos para un metal dado en el entorno, así como muy pequeñas influencias antropogénicas.

Para la caracterización del índice de geoacumulación, se consideran los valores del fondo geoquímico o valores de referencia. Para integrar las variaciones naturales y las pequeñas cantidades antropogénicas, se multiplica la concentración del fondo geológico por el factor 1,5 para alcanzar el límite superior de la clase menor "0" (prácticamente sin carga). Este factor ha sido utilizado por Tamrakar y Pawan (2011) para evaluar la concentración de metales tóxicos en calles de Katmandú. Nasser (2012) lo empleó para determinar el grado de contaminación en Egipto por metales tóxicos. Bergues determinó el índice de geocumulación por metales tóxicos de suelos del coto minero manganésífero Cristo Barranca.

2.6.-Factor de Enriquecimiento (FE).

El factor de enriquecimiento (FE) ha sido utilizado en estudios de ecotoxicología y de química ambiental como un marco de referencia para imputar la fuentes de contaminación de un elemento en un suelo y de este modo evaluar el posible impacto antropogénico que lo originó (Hakanson, 1979).

Otra manera que se ha propuesto para evaluar el grado de contaminación de los metales tóxicos en polvos es utilizando el factor de enriquecimiento, en donde se considera la relación del metal a evaluar y los elementos que se encuentran con más abundancia en la corteza terrestre. Los elementos de referencia aplicables para este tipo de estudios son aquellos cuya naturaleza geoquímica permite que sus cantidades sustanciales no produzcan efectos de antagonismo o sinergismo con los elementos examinados (Aikpokpodion, 2010). Los elementos de referencia más empleados son: aluminio, escandio, manganeso y hierro (Poissant, *et al.*, 1994). Este factor de enriquecimiento se calcula por medio de la ecuación (2):

$$FE = \frac{(X / Fe)_{polvo}}{(X / Fe)_{corteza}} \quad (2)$$

Donde:

X_{polvo} = representan la concentración del metal a analizar.

Fe_{polvo} = representan la concentración obtenida de hierro.

$(X/Fe)_{polvo}$ y $(X/Fe)_{corteza}$ indican una relación entre la corteza terrestre del elemento X con relación con el hierro proveniente de los polvos que se encuentran

sobre la superficie del asfalto y al promedio del elemento presente en la corteza terrestre respectivamente.

Este factor fue empleado por Nasser (2012) para determinar el grado de contaminación en Egipto. Bergues (2011) utilizó este factor para evaluar la contaminación de metales tóxicos en suelos del coto minero manganesífero Cristo Barrancas. Aguilar (2005) determinó la contaminación por metales tóxicos en suelos de la Cuenca Alta.

2.7.-Factor de Contaminación (Cf) y Grado de Contaminación (Cd).

Uno de los métodos más comunes para estimar el estado de enriquecimiento de un metal tóxico en sedimentos, es el uso del “Factor de Contaminación” (Cf) basado en la aproximación dada por (Hakanson, 1980), se calcula por medio de la ecuación (3).

$$Cf = Cs / Cb \quad (3)$$

Donde Cs es la concentración medida del metal tóxico examinado de los polvos de la avenida y Cb es la concentración de la corteza terrestre o valor de referencia del metal o el valor de fondo de metales tóxicos en suelos no contaminados.

El Grado de Contaminación ayuda a conocer de manera general el grado de contaminación que puede tener un suelo, se calcula como la sumatoria de los factores de contaminación (Cf) obtenidos para cada metal analizado, su expresión matemática (4) es:

$$Cd = \sum Cf \quad (4)$$

Este factor fue utilizado por Nasser (2012) lo empleó para determinar el grado de contaminación en Egipto. Wang (2013) evaluó el potencial contaminante en suelos recuperados en una mina de carbón a cielo abierto.

2.8.- Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI).

El factor potencial de riesgo ecológico (RI) propuesto por Hakanson (1980), este factor evalúa el potencial de riesgo ecológico de los metales tóxicos. Este método considera ampliamente la sinergia, el nivel tóxico, la concentración de los metales tóxicos y la sensibilidad ecológica ante los metales tóxicos. RI está formado por tres módulos básicos: el factor de contaminación (Cf) el factor tóxico-respuesta (Tr) y el potencial índice de riesgo ecológico (Er). y se calculan por medio de las ecuaciones (5) y (6):

$$Er = Tr \times Cf \quad (5)$$

$$RI = \sum Er \quad (6)$$

Hakanson (1980) sugirió que los valores de Tr: Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu y As, son de 30, 2, 3, 5, 1, 5 y 10, respectivamente. El factor Potencial de riesgo ecológico es una perspectiva sedimentología para evaluar las características y el comportamiento ambiental de los metales tóxicos en sedimentos. Además de considerar los metales tóxicos en los suelos, el método Hakanson evalúa sus posibles efectos ecológicos y ambientales con la toxicología. Este método es capaz de reflejar los efectos de diversos contaminantes y revelar la influencia global de múltiples contaminantes en un entorno particular.

Este factor fue empleado por Nasser (2012) para determinar el grado de contaminación en Egipto. Wang (2013) evaluó el potencial contaminante en suelos recuperados en una mina de carbón a cielo abierto.

2.9.- Factor de Movilidad (FM).

El factor de movilidad es la capacidad que tienen los elementos de ser transportados de un ambiente a otro. Algunos elementos muestran un alto grado de movilidad durante la dispersión en ambientes. Cuando un metal se encuentra enlazado débilmente al sustrato, su índice de biodisponibilidad es alto porque el metal puede ser solubilizado con ligeros cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo.

Para la evaluación del factor de movilidad se propone la siguiente ecuación (7):

$$FM = \left(\frac{F1}{F1 + F2 + F3 + F4} \right) \times 100 \quad (7)$$

Donde:

F1 = Resultados de la fracción ácido soluble, mg/kg.

F2 = Resultados la fracción reducible, mg/kg.

F3 = Resultados de la fracción oxidable, mg/kg.

F4 = Resultados de la fracción residual, mg/kg.

El Grado de Movilidad de los contaminantes indica la peligrosidad de un material que depende directamente de su capacidad para liberar los metales tóxicos. Este factor fue utilizado por Fuentes (2010) para la distribución de los sedimentos superficiales del Saco del Golfo de Cariaco, Sucre Venezuela. Elsa 2012 determinó el factor de movilidad de metales en polvos, para cuantificar la peligrosidad de la biodisponibilidad los metales tóxicos, mediante el método BCR.

2.10.- Evaluación de la Movilidad de los Metales Tóxicos.

La evaluación de la movilidad de metales tóxicos es una actividad importante cuando se quiere valorar el potencial de riesgo que existe sobre la salud, este procedimiento de extracción secuencial se aplica para evaluar metales asociados al suelo en una zona de estudio; el cual aporta información muy valiosa acerca de la movilidad y biodisponibilidad de los metales en organismos vivos (Barco, 2012).

La movilidad de un metal no sólo depende de su especiación química, sino de una serie de parámetros del suelo tales como pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de arcilla etc.

Los contaminantes pueden abandonar un suelo por volatilización, disolución, lixiviados o erosión, y pasar a los organismos cuando pueden ser asimilados, lo que normalmente ocurre cuando se encuentran en forma más o menos soluble. En concreto, la posibilidad de que un elemento (contaminante o no) quede libre y pase a disolución en un suelo se le llama disponibilidad. La biodisponibilidad sería el grado de libertad en que se encuentra un elemento o compuesto de una fuente potencial para ser capturado por un organismo (ingerido o adsorbido). Su efecto suele ser negativo, pero también puede ser diferente para un organismo específico (Galán y Romero, 2008).

Cuando un metal se encuentra enlazado débilmente al sustrato, su índice de disponibilidad es alto porque el metal puede ser solubilizado con ligeros cambios en las condiciones fisicoquímicas del suelo, como una reducción del pH o del potencial redox (Alloway, 1990).

Cuando los metales se encuentran unidos fuertemente al sustrato su estabilidad es muy alta y necesitan cambios fisicoquímicos muy drásticos que normalmente no ocurren en la naturaleza para que se conviertan en formas solubles. Si la mayor concentración de los metales se encuentra en esta fracción, indica una baja biodisponibilidad y en consecuencia la probabilidad de un efecto tóxico se reduce. Esta información sólo se puede obtener con un estudio de extracción secuencial de los metales potencialmente tóxicos (Pérez-Cid, *et al.*, 1999).

2.11.- Método BCR.

La cantidad total de metal asociado a la partícula no necesariamente se moviliza en el organismo, en la mayoría de los casos sólo una fracción de esta lo hace y puede llegar al torrente sanguíneo y causar efectos dañinos sobre los seres humanos (Ruby, *et al.*, 1999).

Uno de los métodos que ha sido utilizado para evaluar la movilidad de los metales en polvos son las extracciones secuenciales de especiación química. Una muestra se somete a los ataques de diversas soluciones con el propósito de simular la movilidad de los metales particulados de las diferentes zonas del tracto digestivo (Flores, 1992).

El esquema de extracción secuencial BCR (BCR o SES, por sus siglas en inglés), divide el contenido total de metal presente en tres fracciones, las cuales se liberan mediante una secuencia de extracción en orden de movilidad y peligrosidad decreciente (Rauret, *et al.*, 2000).

Las tres fracciones, denominadas fracción ácido soluble, fracción reducible y fracción oxidable, se liberan en condiciones operativas bien definidas utilizado sucesivamente ácido acético, clorhidrato de hidroxilamina y peróxido de hidrógeno (Tokatlioglu, *et al.*, 2000). Aunque el protocolo no contempla la fracción residual en virtud de que esta es extremadamente estable y que no representa peligro de movilización de metales tóxicos, se recomienda determinarla para efectos de una revisión interna del método.

2.11.1.- Descripción de las Extracciones Secuenciales del Método BCR.

- ✓ Fracción Intercambiable o ácido-soluble (F1). Evalúa la movilidad de los metales en disolución, unidos a carbonatos e intercambiables. Estos metales son liberados a través de un intercambio iónico, mediante un extractante ácido como el ácido acético, simula las condiciones que se encuentra en el estómago, el cual es un medio ácido con pH cercano a 2.
- ✓ Fracción reducible (F2). Se liberan los metales unidos a óxidos de hierro y manganeso, inestables bajo condiciones reductoras regeneradas por la hidroxilamina (los óxidos se disuelven y se liberan las trazas de metal adsorbidas). Simula las condiciones que probablemente se tiene en el intestino delgado, el cual es un medio ácido-base con pH5 a pH7.
- ✓ Fracción oxidable (F3). Metales unidos a materia orgánica y sulfuros bajo condiciones oxidantes, liberando los metales solubles enlazados a ésta o a sulfuros. Simula las condiciones que probablemente se tiene en el intestino grueso, el cual es un medio básico con pH 8, en este órgano se absorbe el agua como el contenido de nutrientes que no han sido asimilados por el intestino delgado, además sirve como lugar de formación y reservorio de desechos.

- ✓ Fracción residual (F4). Esta fracción incluye los metales de muy baja movilidad ambiental debido a que se encuentran atrapados u encapsulados por minerales primarios como los silicatos o redes complejas de alta estabilidad. Simula el funcionamiento que probablemente se tiene en el recto esta es la parte final del intestino grueso, es donde se encuentran los materiales de desecho que quedan después de todo el proceso de digestión.

En esta investigación se pretende evaluar la movilidad de los metales asociados a los polvos que se encuentran depositados a nivel de piso, utilizando el método BCR.

Diagrama de la simulación de la movilidad de los metales en polvo en el aparato digestivo, como se muestra a continuación en la Figura 2.2.

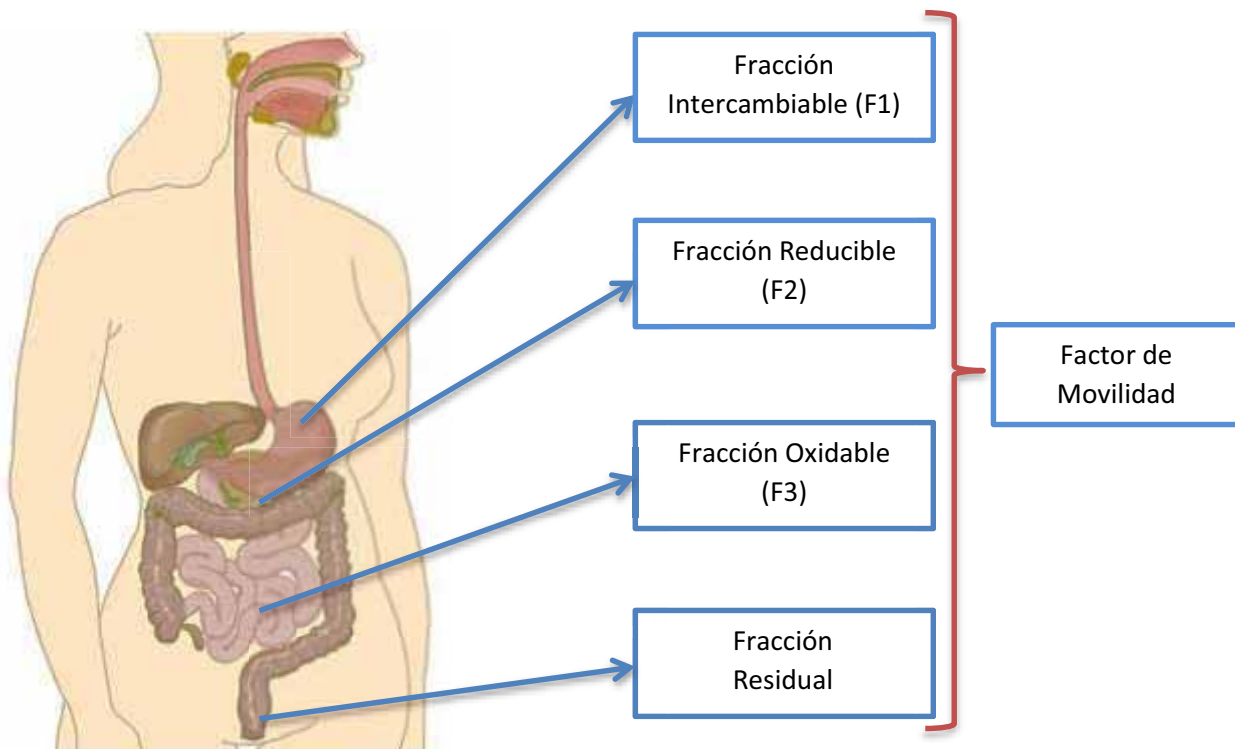


Figura 2.2. Simulación de la Movilidad de los Metales en Polvo en el Aparato Digestivo (Tokatlioglu, *et al.*, 2000; Rauret, *et al.*, 2000).

2.12.-Análisis de Componentes Principales.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante

un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número, perdiendo la menor cantidad de información posible (Baro y Alemany, 2000).

Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí. Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, ya que ésta no viene dada a priori, sino que será deducida tras observar la relación de los factores con las variables iniciales (habrá, pues, que estudiar tanto el signo como la magnitud de las correlaciones). Esto no siempre es fácil, y será de vital importancia el conocimiento que el experto tenga sobre la materia de investigación (Baro y Alemany, 2000).

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

Una vez seleccionados los componentes principales, se representan en forma de matriz. Cada elemento de ésta representa los coeficientes factoriales de las variables (las correlaciones entre las variables y los componentes principales). La matriz tendrá tantas columnas como componentes principales y tantas filas como variables (Peña, 1987).

Para que un factor sea fácilmente interpretable debe tener las siguientes características, que son difíciles de conseguir:

- Los coeficientes factoriales deben ser próximos a 1.
- Una variable debe tener coeficientes elevados sólo con un factor.
- No deben existir factores con coeficientes similares.

2.13.- Correlación de Spearman.

La correlación de Spearman es una medida de asociación lineal que utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos. Existen dos métodos para calcular el coeficiente de correlación de los rangos uno señalado por Spearman y otro por Kendall. La correlación de Spearman es recomendable utilizarlo cuando los datos presentan valores externos ya que dichos

valores afectan mucho el coeficiente de correlación de Pearson, o ante distribuciones no normales (Badii, *et al.*, 2014).

Una correlación paramétrica se aplica para casos en donde la distribución de los datos sigue una curva Gausiana o normal. Sin embargo, los datos conseguidos en las ciencias naturales y ciencias sociales, raramente se ajustan a la curva normal, y por esto cuando se trata de estudiar el grado de correlación en estas ciencias uno debe utilizar técnicas de correlación no-paramétrica, las cuales son libres de distribución, es decir, no existe la necesidad de que los datos tengan una distribución normal (Badii, *et al.*, 2014).

En caso de rango de correlación de Spearman, después de dar los rangos a cada medición de la variable se usará la ecuación siguiente para proceder con la operación.

$$r_s = 1 - [6 \sum d_i^2 / (n^3 - n)]$$

Donde,

d_i = diferencia entre rangos de X y Y.

El valor de r_s varía de “-1” hasta “+1” y no tiene unidad, sin embargo, este valor es diferente del valor de r calculado por el método de Pearson.

El coeficiente de correlación oscila entre -1 y +1 encontrándose en medio el valor 0 que indica que no existe asociación lineal entre las dos variables de estudio. Un coeficiente de valor reducido no indica necesariamente que no exista. Los métodos no paramétrico estarían mejor utilizados en este caso para mostrar si las variables tienden a elevarse conjuntamente o a moverse en direcciones diferentes (Pita y Pértiga, 1997).

Ventajas del coeficiente de Spearman:

1. Al ser Spearman una técnica no paramétrica es libre de distribución probabilística.
2. Los supuestos son menos estrictos. Es robusto a la presencia de outliers (es decir permite ciertos desvíos del patrón normal). La manifestación de una relación causa-efecto es posible sólo a través de la comprensión de la relación natural que existe entre las variable y no debe manifestarse sólo por la existencia de una fuerte correlación .

2.14.- Normatividad.

Para la discusión de los resultados obtenidos, se buscaron Normas Oficiales que establecieran niveles permisibles de metales tóxicos en polvo de la calle. Sin embargo, en México sólo existen criterios internos de restauración de suelos emitidos por la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (NOM 147- SEMARNAT/

SSA1-2004). Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por metales.

Tabla 2.1 .Concentraciones de Referencia Totales (CRt) por Tipo de Uso de Suelo (NOM 147-SEMARNAT/ SSA1-2004).

Contaminante	Uso residencial (mg/kg)	Uso agrícola (mg/kg)	Uso industrial (mg/kg)
Plomo total	400	400	800
Arsénico total	22	22	260
Cadmio total	37	37	450
Cromo Total	280	280	510

Para tener una idea de la magnitud de la contaminación por los metales estudiados, se encontraron valores que establecen concentraciones de metales en polvos relacionados con efectos tóxicos a la salud, propuestos por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (EPA), los cuales se consideraron como comparativos para los resultados obtenidos en este estudio.

Tabla 2.2 . Concentración de Metales Tóxicos en Polvo Relacionado con Efectos Tóxicos a la salud.

Metal	Concentración
Plomo	>250
Arsénico	>100
Mercurio	>2

Para tener una idea de la magnitud de la contaminación por estos metales se pueden comparar los valores obtenidos con los límites establecidos o propuestos en otros países. Por ejemplo se consideraron los límites máximos establecidos como valores guías y normas de calidad de suelos en Holanda (Ministry of Housing, 1991), los valores de calidad ambiental de los usos del suelo en Canadá (Canadian Council of Ministers of the Environment, 1991), y los límites de seguridad propuestos por los Estados Unidos (EPA,1997).

Tabla 2.3. Criterios de Calidad de los Suelo en Holanda, Canadá y Estados Unidos.

País	Criterio	Plomo (mg/kg)	Cobre (mg/kg)	mercurio (mg/kg)
Holanda	B	150	100	30
	C	600	500	50
	STV	85	36	290
Canadá	F	25	30	*
	R	500	150	*
Estados Unidos	Rango de restauración de suelo	200-500	*	1-21

Donde (B) es para concentraciones superiores a estos límites, se sugiere realizar un estudio epidemiológico, (C) límite para efectuar la restauración del suelo contaminado, (STV) las concentraciones deseadas o admisibles en el suelo, (F) concentraciones naturales en suelos no contaminados, (R) valores máximos permitidos para los suelos de uso residencial. * valores no localizados en la literatura.

3.- Metodología y Desarrollo Experimental

3.1.- Diseño Experimental.

Para satisfacer los objetivos planteados, se divide la parte experimental en 4 etapas: muestreo, metales totales, metales totales por tamaño de partícula y método BCR.

El muestreo contempla la primera etapa y la más importante al momento de obtener resultados confiables, es así que las muestras de polvos de calle deben ser representativas. En este trabajo se compararon diez sitios de muestreo de la avenida Paseo de la Reforma.

En la segunda etapa se realizó el método de metales totales, se ocupó un tamiz de una malla de 1.9 mm para eliminar material no deseado en los polvos recolectados, La extracción de metales en polvos se llevó a cabo mediante digestión ácida y se procedió a la cuantificación en mg/kg de plomo, cadmio, hierro, zinc y cobre de los diez puntos de muestreo para realizar el cálculo de los índices y factores de contaminación. Se realizó un ANOVA para saber las correlaciones que existen entre concentraciones de metales tóxicos, puntos de muestreo y flujo vehicular.

En la tercer etapa se realizó una separación granulométrica con tamaño de tamiz de 1190, 250, 220 y 200 micrómetros. Se determinó la concentración de metales por medio de digestión ácida y se procedió a la cuantificación en mg/kg de plomo, cadmio, hierro, zinc y cobre para hacer una comparación de los diferentes tamaños de partícula en polvos. Se realizó un análisis granulométrico respecto a la concentración de metales tóxicos a lo largo de la zona muestreada en la avenida Paseo de la Reforma.

Y final mente con el tamaño de partícula de 250 micrómetros se realizó la evaluación de la movilidad de metales tóxicos (BCR) el cual consiste en una simulación gastrointestinal de la movilidad y biodisponibilidad de los metales contenidos en polvos. De igual manera se procedió a la cuantificación en mg/kg de plomo, cadmio, hierro, zinc y cobre para hacer el cálculo del factor de movilidad. Se realizó un ANOVA para saber las correlaciones que existen entre concentraciones de metales tóxicos, puntos de muestreo y fracciones (ácido soluble, reducible, oxidable y residual). Una descripción de la metodología se resume en la Figura 3.1.

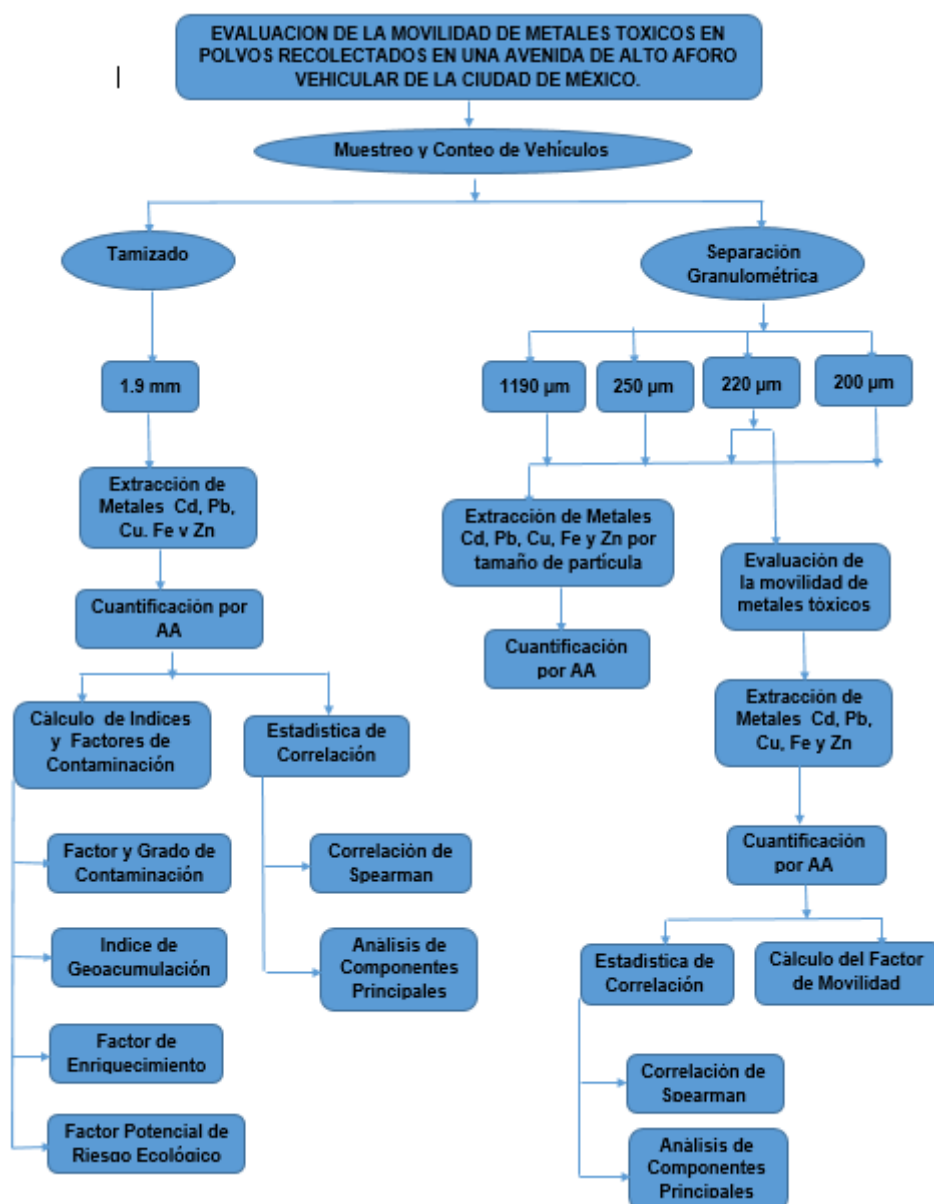


Figura 3.1 . Diagrama General de Flujo.

3.2.- Estrategia de Muestreo.

La recolección de la muestra, como el conteo de los automotores, ambas actividades se realizó durante los primeros tres viernes del mes de septiembre del 2014 en un horario de las 10:30 am a 12:00 pm (horario no conflictivo), en temporada de lluvia. Se realizó un muestreo a lo largo de la avenida Paseo de la Reforma, se seleccionaron 10 puntos de muestreo correspondiente a las 10 glorietas de esta avenida. Se tomaron muestras por medio de una aspiradora de mano (Black and Decker), se aspiró aproximadamente un metro cuadrado de polvo acumulado en las

aceras y asfalto de cada glorieta, aproximadamente 100 g de polvo, estas muestras se transfirieron en bolsas de polietileno herméticamente cerradas (Figura 3.2) y trasladadas al laboratorio para su tratamiento.

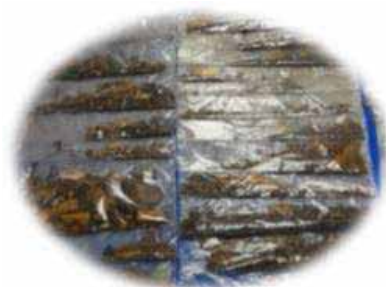


Figura 3.2- Recolección de los 10 Puntos de Muestreo.

3.3.- Flujo Vehicular.

Se realizó un conteo de automóviles que circulan sobre la zona de estudio por un lapso aproximado de 3 minutos, con ayuda de una cámara. Se contaron los automóviles particulares, motos, autobuses y automóviles de servicio público; este conteo se realizó con el fin de hacer una estadística de correlación de la concentración de cada metal, los puntos de muestreo y el flujo vehicular.

3.4.- Sitio de Muestreo.

Se tomaron las muestras en la avenida Paseo de la Reforma de las siguientes glorietas: Cuitláhuac, San Martín, Simón Bolívar, el Globo, Colón, Cuauhtémoc, la Palma, Ángel de la Independencia , Diana Cazadora y Fuentes de Petróleo, con el fin de comparar las concentraciones de cada metal, su movilidad y biodisponibilidad.

A continuación se muestra la zona de estudio, indicando las diez glorietas a lo largo de la avenida Paseo de la Reforma. figura 3.3.

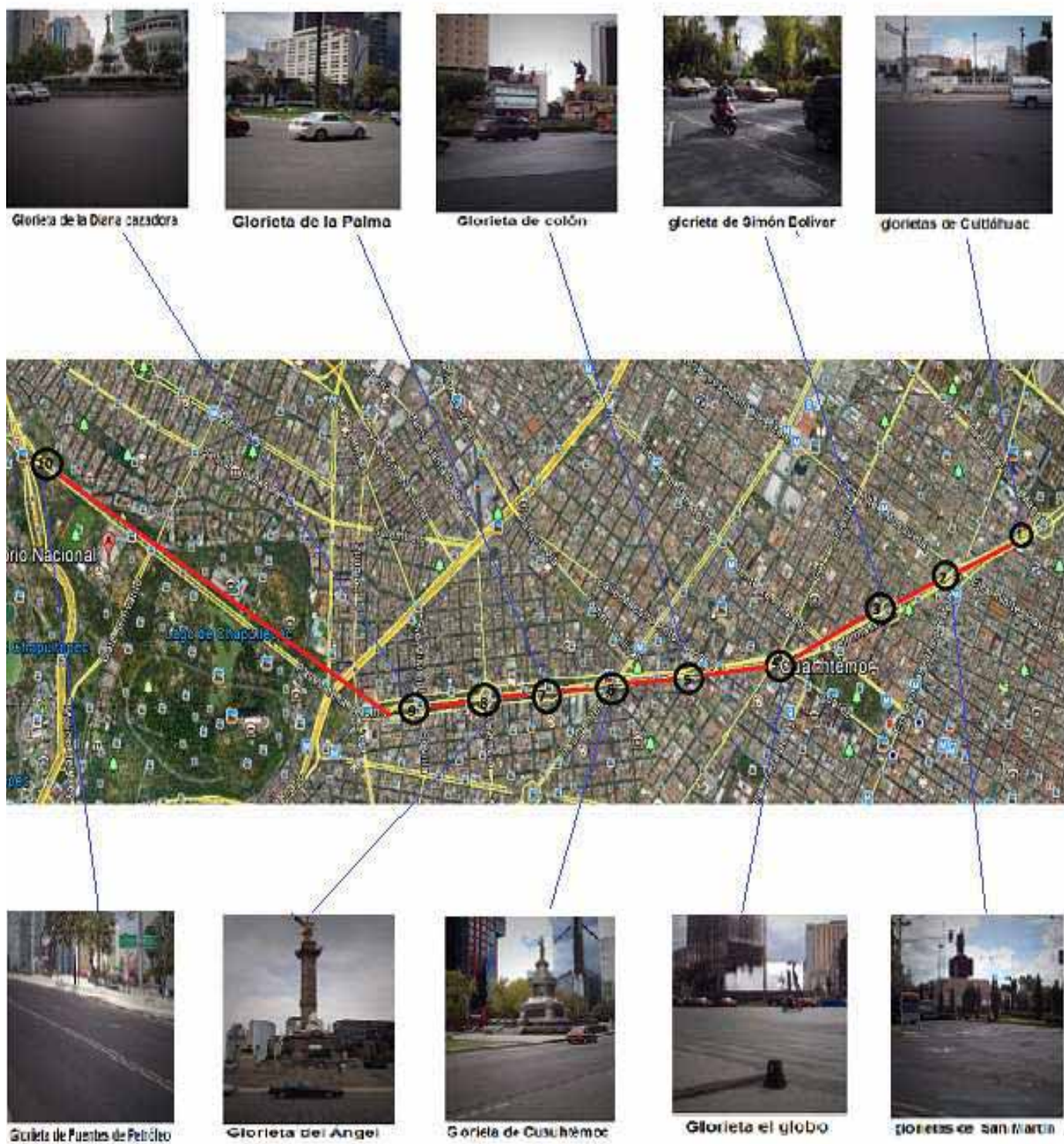


Figura 3.3. Zona de Estudio Paseo de la Reforma.

3.5.- Descripción de la Zona de Muestreo.

Paseo de la Reforma es la avenida más importante y hermosa de la ciudad, y una de las más famosas del mundo, es la avenida principal de la Ciudad de México que corre de este a oeste. Se llamó así para conmemorar las reformas liberales del siglo XIX promulgadas por el presidente Benito Juárez. Fue construida en 1860, durante el imperio de Maximiliano de Habsburgo, con el propósito de comunicar el Castillo de Chapultepec con el Palacio Nacional. El constructor fue el ing. Austriaco Ferdinand Von Rosenzweig (Turiguide México).

El Paseo de la Reforma mide 12 kms de longitud y en algunos tramos cuenta hasta con ocho carriles. La avenida va desde el parque de Chapultepec, pasando por la Zona Rosa y termina dirección al Zócalo, en avenida Juárez y Francisco I. Madero. Adicionalmente, se realizaron dos extensiones, una que va hacia Tlatelolco y otra que parte de Chapultepec, continúa por Polanco y las Lomas hasta llegar a la moderna zona de Cuajimalpa y Santa Fe.

A lo largo de su trayecto hay importantes monumentos, museos, hoteles, edificios, restaurantes y tiendas, entre los monumentos que en ella se encuentran como el Monumento a Colón, el Monumento a Cuauhtémoc, la Fuente de la Diana Cazadora, Ángel de la Independencia, además de que en esta avenida tienen su sede hoteles de categoría mundial, los principales grupos financieros de México y América Latina, así como algunos de los edificios más representativos de la Ciudad de México como la Bolsa Mexicana de Valores y la Torre Mayor el edificio más alto de Latinoamérica (Turiguide México).

3.6.- Lavado de Material.

Debido a que en la realización del presente estudio se miden concentraciones de metales muy bajas, cualquier impureza que se encuentre en el material puede afectar el análisis, por ende, lo primero que se realizó fue lavar todo el material ya sea de plástico o de vidrio que se utilizó dentro de la experimentación y cuya técnica de lavado reportada por Flores (1992) se describe a continuación:

Se enjuaga previamente todo el material de plástico y de vidrio con agua de llave, se lavó con detergente común y se enjuaga con agua de la llave. El material se sumergió en ácido nítrico al 10 % por un tiempo de 24 horas, se sacó el material de la solución nítrica, se volvió a lavar el material pero ahora con agua destilada y se colocó en una estufa a temperatura de 75 ° C para su secado.

3.7.- Tamizado.

Una vez recolectado el polvo de los sitios se depositaron en charolas y se introdujeron en una estufa para eliminar la humedad, durante 24 horas a una temperatura de 75° C. Al concluir el tiempo se almacenaron las muestras en bolsas Ziploc.

Cada una de las muestras recolectadas fue tamizada por una malla de 1.9 mm, con el fin de eliminar residuos inútiles para el estudio, como pedazos de madera, cabellos, pedazos de hojas, piedras grandes, pedazos de plástico, entre otros objetos, por lo que serán descartados del análisis. Con las muestras ya tamizadas se procede a realizar la técnica de metales totales.

3.8.- Distribución Granulométrica.

Las muestras recolectadas de los sitios de estudio de las 10 glorietas, fueron tamizadas por cuatro mallas diferentes, con las siguientes aberturas: 1190, 250, 220 y 200 μm como se muestra en la figura 3.4, para obtener una distribución granulométrica, se colocaron las muestras en el primer tamiz de a parte superior y se procedió a agitar el juego de tamices durante 15 minutos. Con las muestras ya tamizadas se procede a realizar la técnica de metales totales por tamaño de grano.

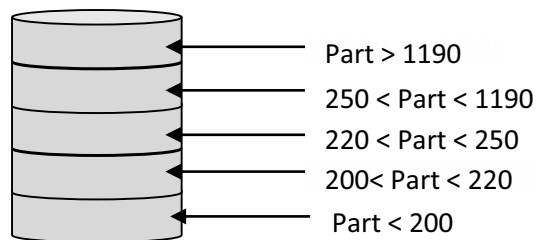


Figura 3.4. Tamaño de Grano para el Tamizado de Partículas.

Se pesó el contenido de material retenido por todos y cada uno de los tamices y se guardaron en bolsas de plástico Ziploc previamente pesadas y etiquetadas.

3.9.- Extracción de Metales Totales y por Tamaño de Grano.

3.9.1.- Extracción de Metales Totales.

Se evaluó la concentración de metales tóxicos por medio de digestión ácida con la mezcla de ácidos concentrados (HNO_3 - HClO_4 -HF). Haciendo uso de las partículas menores a 1190 μm , para la extracción de metales totales. Este método se realizó por duplicado para cada una de las muestras recolectadas.

Procedimiento de digestión:

Se tomaron 0.5 g de la muestra de polvo seco, la cual se depositó en un vaso de teflón, se le añadieron 2 mL de ácido perclórico concentrado (HClO_4) más 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), se llevó a sequedad en un baño de arena a 110 °C; se le adicionaron 10 mL de ácido fluorhídrico concentrado (HF) más 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), se llevó a sequedad en baño de arena a 110 °C; posteriormente se realizó la extracción de la muestra con solución nítrica al 10 % depositándola en tubo para centrifugar a 3000 rpm durante 10 min; se lleva cabo la filtración desechando la fase sólida y la fase líquida se mantendrá en refrigeración a 4°C hasta antes del análisis, como se muestra en la figura 3.5 (Flores, 1992).

3.9.2.- Extracción por Tamaño de Grano.

Haciendo uso de las partículas provenientes de los tamices 1190, 250, 220 y 200 μm , se evaluó la concentración de metales tóxicos por tamaño de grano realizando el mismo procedimiento de Metales Totales.

Procedimiento de digestión por tamaño de grano:

Se tomaron 0.5 g de la muestra de polvo seco, la cual se depositó en un vaso de teflón, se le añadieron 2 mL de ácido perclórico concentrado (HClO_4) más 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), se llevó a sequedad en un baño de arena a 110 °C; se le adicionaron 10 mL de ácido fluorhídrico concentrado (HF) más 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), se llevó a sequedad en baño de arena a 110 °C; posteriormente se realizó la extracción de la muestra con solución nítrica al 10 % depositándola en tubo para centrifugar a 3000 rpm durante 10 min; se lleva cabo la filtración desechando la fase sólida y la fase líquida se mantendrá en refrigeración a 4°C hasta antes del análisis, como se muestra en la figura 3.5 (Flores, 1992).

La determinación de las concentraciones de los metales Pb, Cd, Cu, Zn y Fe, de las soluciones obtenidas, se realizó mediante espectrofotometría de Absorción Atómica, técnica de flama, usando las lámparas y condiciones óptimas de operación para cada

elemento, previa calibración del equipo, realizando curvas de calibración para cada metal, de igual manera, se analizaron blancos de reactivo para tener un control del análisis como la validación del procedimiento.

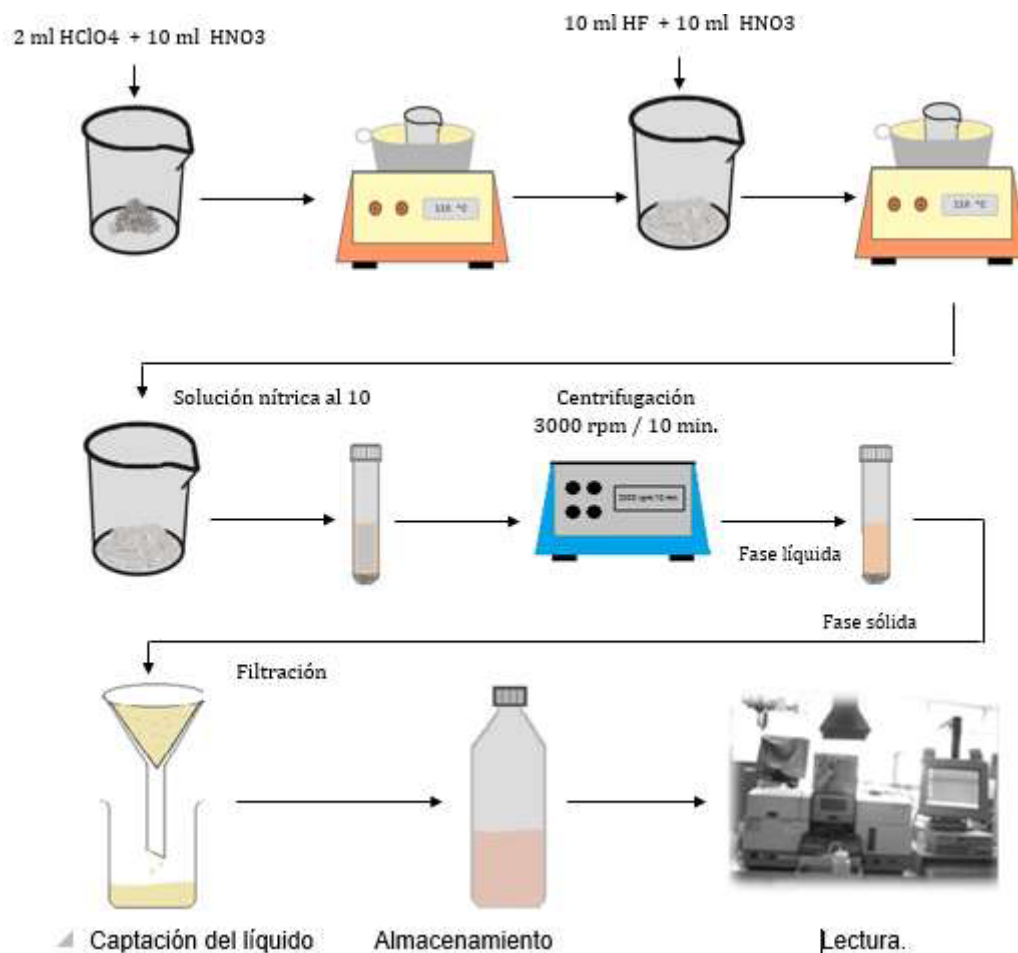


Figura 3.5. Diagrama de Flujo de Digestión de Metales Totales.

3.10.- Metodología BCR.

El método de extracción secuencial BCR es el proceso de cuantificación de las formas químicas de un mismo elemento en una muestra dada.

El grado de movilidad de los contaminantes de las muestras en estudio, aplicando el procedimiento de extracción secuencial (BCR), indicará la peligrosidad de un material. Este va a depender directamente de su capacidad para liberar los metales tóxicos, este método consiste en dividir el contenido total en estudio en tres fracciones, por orden de movilidad y peligrosidad decreciente.

Estas tres fracciones se les denominan: fracción ácido soluble, fracción reducible y fracción oxidable, los metales tóxicos se liberan por extracción secuencial, utilizando sucesivamente ácido acético, clorhidrato de hidroxilamina y peróxido de hidrógeno.

La fracción ácido soluble (F1) evalúa la fracción total de metal sometido a condiciones ácidas, la fracción reducible (F2) evalúa la fracción del metal que se desprende bajo condiciones reductoras, la fracción oxidable (F3) es la fracción del metal asociado a las partículas sometidas a la acción oxidante de los microorganismos y la fracción residual (F4) es la fracción más estable y la menos peligrosa para la salud.

3.10.1. Fracción Ácido Soluble.

Etapa 1 (Simulación del estómago) .- En un tubo de centrifugación se le agregó 1 g de muestra seca y cribada, con 15.2 mL de ácido acético a 0.11 M.

La muestra se agito durante 16 horas a temperatura ambiente y a 40 rpm; el extracto se separó del residuo sólido por medio de centrifuga a 2400 rpm durante 20 min, se filtró con papel N° 40 y se almacenó a 4 °C en un recipiente de polietileno.

3.10.2.- Fracción Reducible.

Etapa 2 (simulación del intestino delgado).- El residuo limpio que se obtendrá de la 1ª etapa se le agregó 15.2 mL de clorhidrato de hidroxilamina a 0.5 M y pH = 2. Se agitó durante 16 horas a 40 rpm, se filtró con papel N° 40 y se almacenó a 4 °C en un recipiente de polietileno.

3.10.3.- Fracción oxidable.

Etapa 3 (Simulación del intestino grueso).- Al residuo obtenido de la 2ª etapa se le agregó 10 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) en un tubo de centrifugación, y se colocó por una hora a digestión a temperatura ambiente. Se le retiró el tapón del tubo para que el contenido del mismo reduzca el volumen a 1 mL, aproximadamente por evaporación.

Después se agregó 19 mL de acetato de amonio a 1 M y pH = 2, se agitó durante 16 horas a 170 rpm de manera Orbital, se filtró con papel N° 40 y se almacenó a 4 °C en un recipiente de polietileno.

3.10.4.- Fracción Residual.

Al residuo sólido de la 3ª etapa del proceso de extracción, se secó a temperatura ambiente y se utilizó para determinar la fracción residual por medio de digestión ácida con la mezcla de ácidos concentrados (HNO_3 - HClO_4 - HF).

Procedimiento de digestión de la fracción residual :

Se tomaron 0.5 g de la muestra de polvo seco, la cual se depositó en un vaso de teflón, se le añadieron 2 mL de ácido perclórico concentrado (HClO_4) más 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), se llevó a sequedad en un baño de arena a 110 °C; se le adicionaron 10 mL de ácido fluorhídrico concentrado (HF) más 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), se llevó a sequedad en baño de arena a 110 °C; posteriormente se realizó la extracción de la muestra con solución nítrica al 10 % depositándola en tubo para centrifugar a 3000 rpm durante 10 min; se lleva cabo la filtración desechando la fase sólida y la fase líquida se mantendrá en refrigeración a 4°C hasta antes del análisis, como se muestra en la figura 3.5 (Flores, 1992).

El análisis de cada una de las fracciones se realizó por medio de espectrofotometría de absorción atómica, se emplearon estándares de cada elemento y se realizó por duplicado cada muestra.

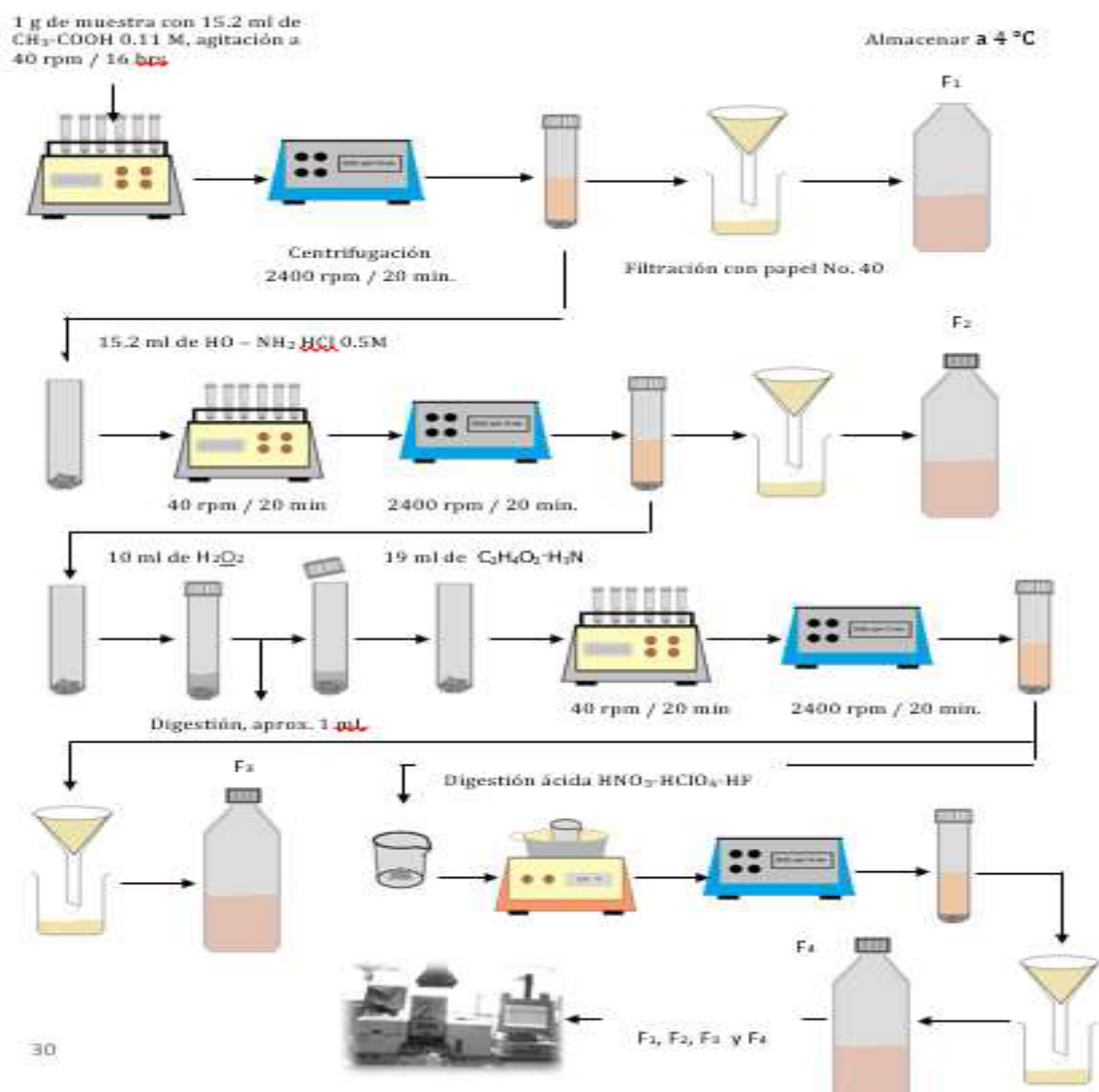


Figura 3.6. Diagrama de Flujo del Método de Extracción Secuencial BCR.

4.-Presentación de Resultados

4.1.- Sitios de Muestreo.

En la tabla 4.1 se muestran los resultados de la cantidad de muestra recolectada de cada uno de los diez puntos de muestreo a lo de la avenida Paseo de la Reforma.

Tabla 4.1 Muestra Obtenida por Glorieta.

Glorieta	Muestras de polvo (g)			Total
	Muestra de Polvo Recogida (g)	Muestra de Polvo Seca (g)	Muestra de Polvo Final (g)	
Cuitláhuac	251.8	232.8	155	639.7
San Martín	191	168.6	79.4	439.2
Simón Bolívar	136.9	121.8	73.1	331.9
El Globo	60.9	56.9	43.3	161.1
Colón	50.7	47.8	44.5	143.1
Cuauhtémoc	45.2	44.7	42.1	132
Palma	56.3	47.1	37.2	140.6
Ángel	112.3	94.7	77.1	284.2
Diana Cazadora	74.2	66.7	55.8	196.8
Fuentes de Petróleo	158.8	138	105.8	402.7
Total	1138.5	1019.5	713.7	2871.7

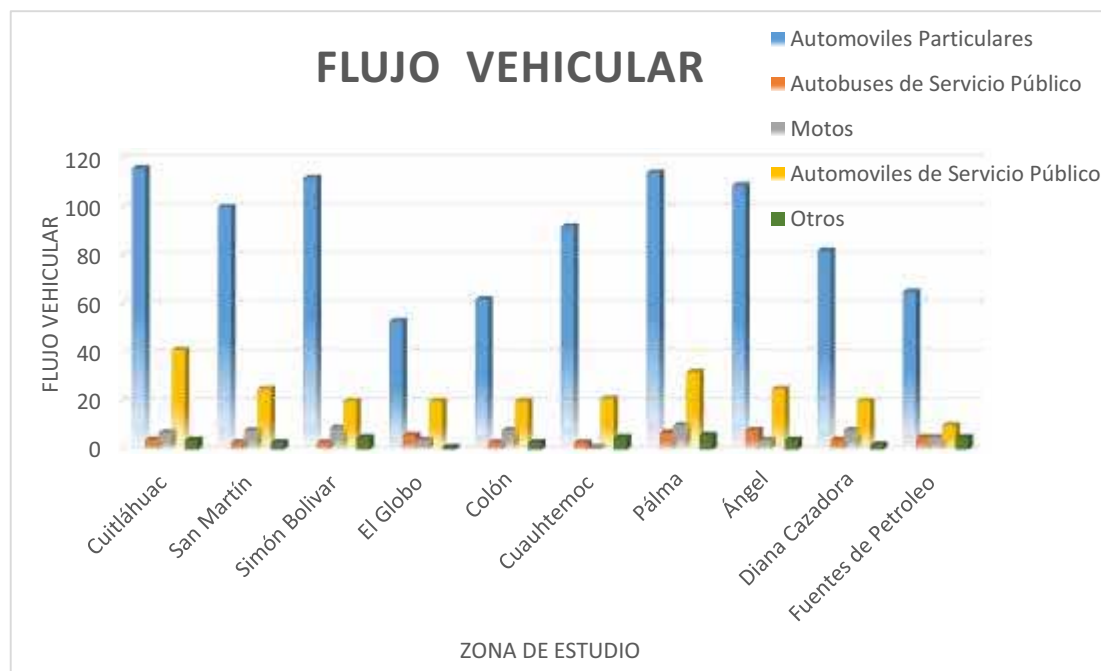
4.2.-Flujo Vehicular.

En la tabla 4.2 y en la gráfica 4.1 se muestra el resultado del aforo vehicular de cada uno de los diez puntos de muestreo, indicando el número de vehículos que circulan en cada glorieta durante un intervalo aproximado de 3 minutos. Se clasificaron 5 tipos de automotores: Automóviles particulares, motos, Autobuses de servicio público (autobuses y microbuses) , automóviles de servicio público (taxis) y otros.

Tabla 4.2 Flujo Vehicular por Glorieta que Circula por la Avenida Paseo de la Reforma.

Gloritas	Automóviles Particulares	Autobuses de Servicio Público (Autobuses y Microbuses)	Motos	Automóviles de Servicio Público (Taxis)	Otros	Total por Glorieta
Cuitláhuac	116	4	7	41	4	172
San Martín	100	3	8	25	3	139
Simón Bolívar	112	3	9	20	5	149
El Globo	53	6	4	20	1	84
Colón	62	3	8	20	3	96
Cuauhtémoc	92	3	1	21	5	122
Palma	114	7	10	32	6	169
Ángel	109	8	4	25	4	150
Diana Cazadora	82	4	8	20	2	116
Fuentes de Petróleo	65	5	5	10	5	90
Total	905	46	64	234	38	1287

Otros: Es transporte mediano o de servicio público, como son patrullas, ambulancias, transporte de mercancía diversa.



Grafica 4.1 Aforo Vehicular por Zona de Estudio en la Avenida Paseo de la Reforma.

De los cinco tipos de vehículos contabilizados, los automóviles particulares son los que presentaron mayor flujo de circulación en las 10 glorietas, así como por número total. De manera particular en la glorieta de Cuitláhuac se identificó el mayor flujo vehicular, encontrándose también valores altos para las glorietas de la Palma, el Ángel, Simón Bolívar y la glorieta de San Martín, mientras que la glorieta de menor aforo vehicular fue la del Globo. Cada sitio de muestreo está caracterizado por diferentes densidades de tráfico, diferentes congestiones vehiculares y por particulares frecuencias de frenado, así como por diferentes componentes de cada vehículo.

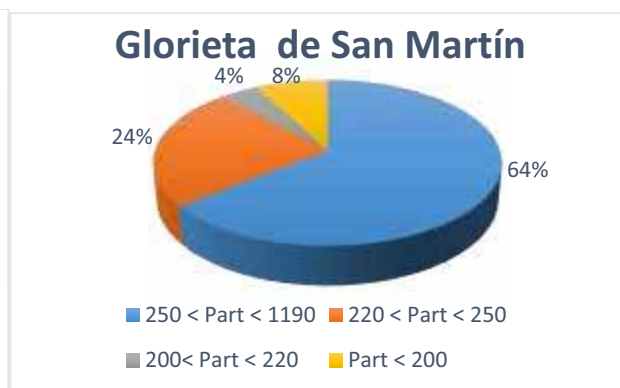
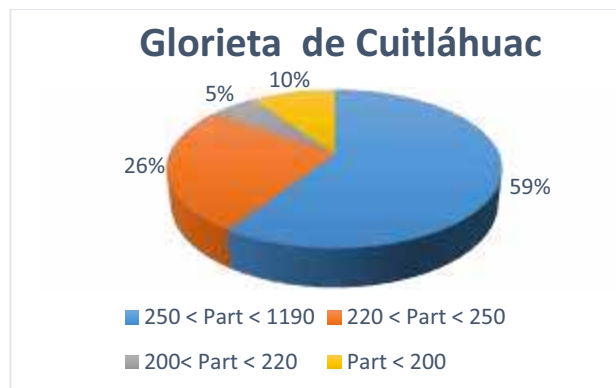
4.3.- Reparto Granulométrico de las Muestras de Polvo.

En la tabla 4.3 se presentan las cantidades, en porcentaje, de las partículas de polvo muestreadas y tamizadas con cuatro diferentes tipos de mallas (1190, 250, 220 y 200 μm de poro), para cada uno de los diez puntos de muestreo.

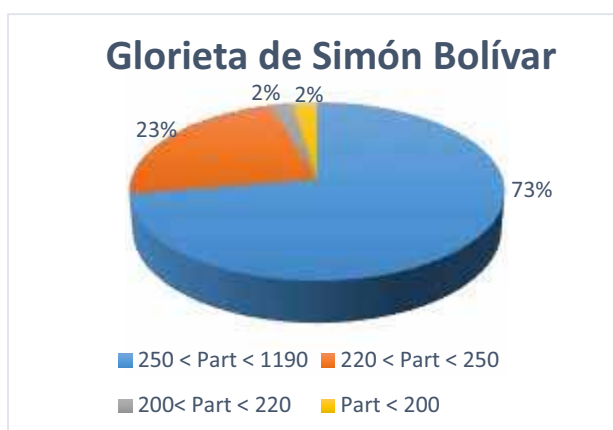
Tabla 4.3- Composición del Tamaño de Partícula de las Muestras Recolectadas (en porcentaje).

Glorieta	Tamaño de Partícula (%)			
	250<Part<1190 μm	220<Part<250 μm	200<Part<220 μm	Part <200 μm
Cuitláhuac	59	26	5	10
San Martín	64	24	4	8
Simón Bolívar	73	23	2	2
El Globo	59	33	4	4
Colón	33	36	8	23
Cuauhtémoc	26	49	11	14
Palma	40	24	7	29
Ángel	61	25	4	10
Diana Cazadora	52	25	6	17
Fuentes de Petróleo	46	38	7	9
% Total	51.3	30.3	5.8	12.4

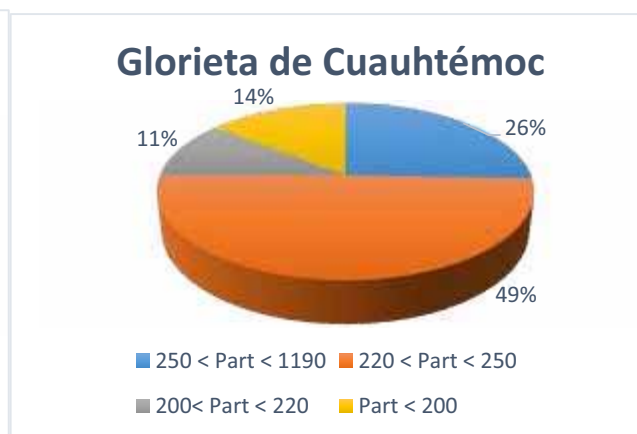
Las gráficas 4.2 a la gráfica 4.11 se esquematiza el reparto granulométrico del polvo tamizado de cada uno de los diez puntos de muestreo de la avenida Paseo de la Reforma.



Gráfica 4.2 Clase Granulométrica de la Glorieta Cuitláhuac. **Gráfica 4.3** Clase Granulométrica de la Glorieta San Martín.

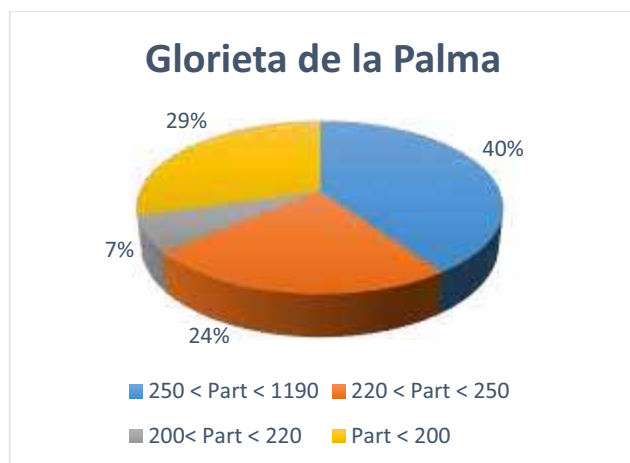


Gráfica 4.4 Clase Granulométrica de la Glorieta Simón Bolívar. **Gráfica 4.5** Clase Granulométrica de la Glorieta Globo.



Gráfica 4.6.Clase Granulométrica de la Glorieta Colón.

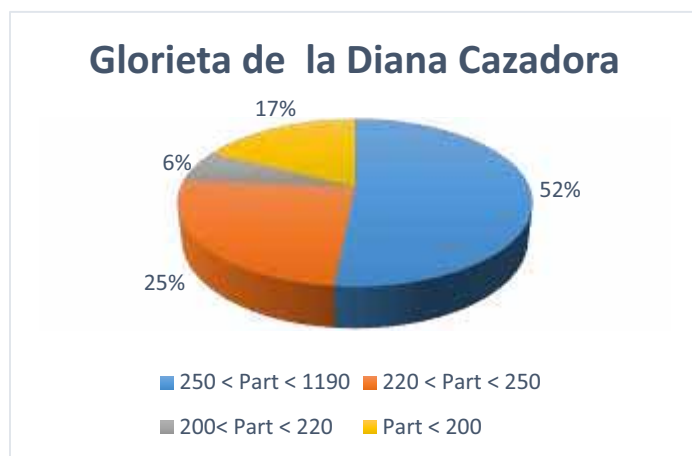
Gráfica 4.7 Clase Granulométrica de la Glorieta Cuauhtémoc.



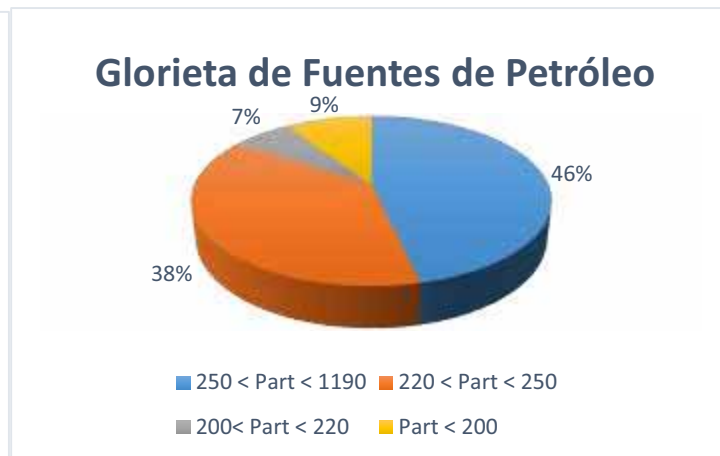
Gráfica 4.8. Clase Granulométrica de la Glorieta de la Palma.



Gráfica 4.9. Clase Granulométrica de la Glorieta del Ángel



Gráfica 4.10 Clase Granulométrica de la Glorieta de la Diana C.



Gráfica 4.11. Clase Granulométrica de la Glorieta de Fuentes.

Las gráficas 4.2 a la 4.11 se presenta la distribución granulométrica para el polvo recolectado en la avenida Paseo de la Reforma. Las partículas de más presencia son las de tamaño inferior a 1190 μm y mayor a 250 μm (51.3 % del total), el cual oscila de 26 a 73 %, estas partículas principalmente provienen de fuentes de combustión del tipo gasolina, diésel o de procesos de fundición a altas temperaturas.

Las partículas de menor presencia corresponde a las partículas menores a 220 μm y mayor a 200 μm (5.8% del total), el cual oscila de 2 a 29 %, estas partículas representan mayor riesgo en términos de salud pública (Romieu *et al.*, 2003).

Durante las lluvias las partículas más pequeñas son arrastradas por el agua al drenaje, o son fácilmente resuspendidas a la atmósfera por el viento. Estas partículas resultan principalmente de procesos de trituración, por lo que estas partículas son de interés en salud pública.

4.4.- Metales Totales.

A partir de las muestras de polvos tamizados con malla de 1190 μm , de cada punto de muestreo a lo largo de la avenida Paseo de la Reforma, se determinó la concentración total de cada tipo de metal (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn), mediante el método de digestión ácida.

4.4.1.- Metales Totales por Punto de Muestreo.

En la tabla 4.4 se presentan las diferentes concentraciones de hierro, plomo, cobre, zinc y cadmio, determinadas por espectrofotometría de absorción atómica, para cada punto de muestreo.

Tabla 4.4 Concentración de Metales Totales en Polvo Recolectados en Avenida Paseo de la Reforma.

Concentración en mg/kg							
Glorieta	HIERRO	ZINC	PLOMO	COBRE	CADMIO	TOTAL	DE MAYOR A MENOR
Cuitláhuac	49977.1 \pm 2.4	42.6 \pm 1.3	233.5 \pm 6.4	97.7 \pm 2.4	3.7 \pm 0.16	50354.7	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
San Martín	64027.1 \pm 4	26.8 \pm 0.2	239.2 \pm 23	88.5 \pm 8.2	3.2 \pm 0.09	64384.8	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Simón Bolívar	43776 \pm 37	19.4 \pm 0.9	110.1 \pm 6.9	73.7 \pm 9.3	5.2 \pm 0.44	43984.4	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
El Globo	51386.3 \pm 4.1	18.3 \pm 1.5	141.1 \pm 5.7	87.4 \pm 6.8	3 \pm 0.26	51636.1	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Colón	50096.6 \pm 22	28 \pm 0.2	179.9 \pm 7.3	67.4 \pm 4.5	3.2 \pm 0.08	50375	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Cuauhtémoc	63977.1 \pm 5.6	26.9 \pm 1.4	128.5 \pm 6.1	119.9 \pm 14.4	3.2 \pm 0.06	64255.5	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Palma	45471.1 \pm 21.3	44.3 \pm 0.3	152 \pm 7.7	78.1 \pm 10.2	3 \pm 0.21	45748.4	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Ángel	36734.7 \pm 1.7	24.9 \pm 1.9	83.1 \pm 10	79.4 \pm 8.4	3.2 \pm 0.52	36925.2	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Diana Cazadora	51461.6 \pm 2	18.3 \pm 1.3	151.6 \pm 14	128.3 \pm 2	3.3 \pm 0.23	51763.2	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Fuentes de Petróleo	43650.4 \pm 5.3	10.3 \pm 0.5	66.4 \pm 0.01	45.6 \pm 2.2	3.7 \pm 0.25	43776.4	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Total	500558	259.9	1485.3	865.9	34.8		Fe>Pb>Cu>Zn>Cd

Las concentraciones de metales determinadas para las muestras de polvos de las glorietas de San Martín y Cuauhtémoc, fueron las más altas en cuanto a hierro, siendo los sitios más contaminados con este metal, 64027.09 \pm 4 mg/ kg y 63977.11 \pm 5.6 mg/kg respectivamente. Mientras que para las muestras de las glorietas de Cuitláhuac y la Palma se obtuvieron los niveles de concentración más altos en zinc, 44.2 \pm 0.8 mg/kg y 42.6 \pm 3.2 mg/kg respectivamente. La glorieta de Simón Bolívar mostró el nivel más alto de cadmio 5.1 \pm 8.5 mg/ kg. Con respecto al plomo los puntos de muestreo con mayor concentración son la glorieta de Cuitláhuac y San Martín. Probablemente el asfalto, los vehículos a diésel y la gran cantidad de automóviles

que circulan en las calles tienen un impacto importante en las concentraciones elevadas de estos metales tóxicos en polvos.

Las concentraciones de los metales de hierro y plomo son las más altas, quizás favorecida porque el hierro es uno de los metales más abundantes en la naturaleza, y el plomo es un metal muy utilizado en la industria. En la tabla anterior se aprecia claramente el mismo orden decreciente de la concentración de metales en todas las glorietas, $Fe > Pb > Cu > Zn > Cd$.

Las comparaciones de cada metal entre los diez puntos de muestreo, son presentados en las gráficas 4.12 a 4.16.

4.4.2- Concentración de Hierro por Punto de Muestreo.

La gráfica 4.12 presenta las concentraciones de hierro presentes en los polvos recolectados en los diez puntos de muestreo de la avenida Paseo de la Reforma, muestran que en la glorieta de San Martín se encuentra el nivel más alto, seguido de la glorieta de Cuauhtémoc. Por el contrario las concentraciones más bajas se localizan en las glorietas del Ángel de la Independencia y Fuente de Petróleo. Las elevadas concentraciones de hierro se deben al alto aforo vehicular, al desgaste de las piezas metálicas de los automóviles y a la abrasión mecánica.

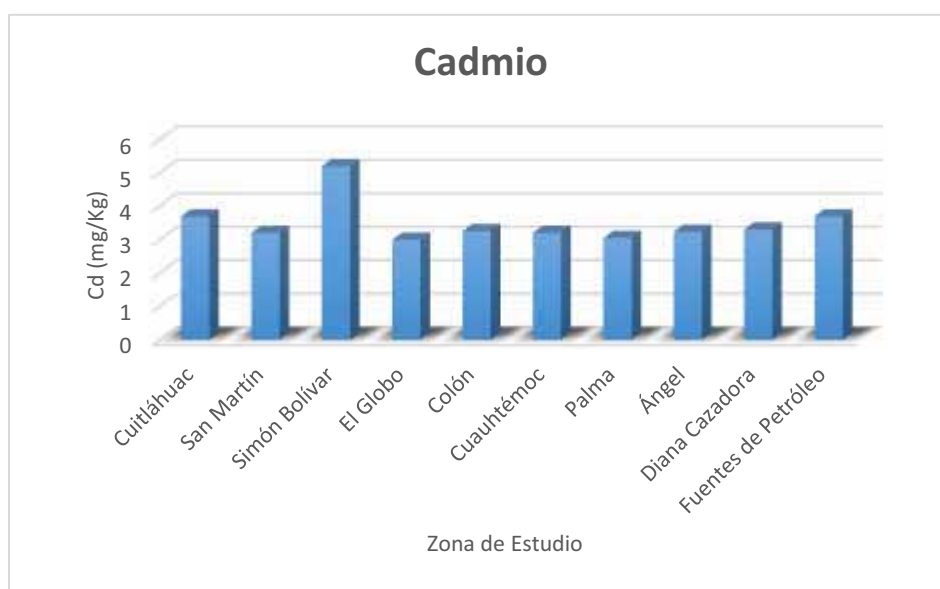


Gráfica 4.12 Concentración Total de Hierro por Zona de Estudio.

4.4.3- Concentración de Cadmio por Punto de Muestreo.

Las concentraciones de cadmio, gráfica 4.13, indican que los niveles son muy similares en la mayoría de las glorietas, con excepción de la glorieta de Simón Bolívar que representa el sitio más contaminado con este metal. El cadmio se atribuye al desgaste de las piezas metálicas de los automóviles, el desgaste de las llantas de automóviles, pintura de señalización en asfalto, lubricantes, etc.

Si consideramos los criterios de la norma 147 SEMARNAT (criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados con metales) las concentraciones de cadmio se encuentran dentro del valor considerado para uso habitacional o agrícola.



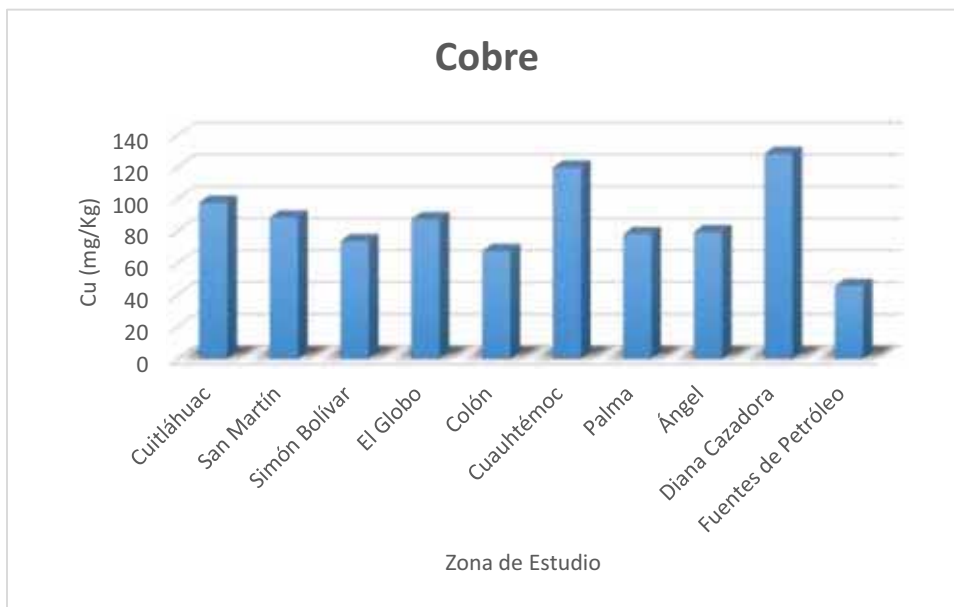
Gráfica 4.13 Concentración Total de Cadmio por Zona de Estudio.

4.4.4- Concentración de Cobre por Punto de Muestreo.

Los resultados obtenidos para el cobre se muestran en la gráfica 4.14. Los niveles máximos de cobre se dan en glorieta de la Diana cazadora, seguida de la glorieta de Cuauhtémoc. Por el contrario las concentraciones mínimas se encuentran en la glorieta de Fuentes de Petróleo. Las elevadas concentraciones de cobre se deben a múltiples factores como el alto aforo vehicular, la corrosión de componentes de automóviles, los esmaltes, los pigmentos, la combustión de gasolina, etc.

De acuerdo con los criterios de calidad de suelos de Canadá y Holanda (*Ministry of Housing, 1991; Canadian Council of Minister of the Environment, 1991*), las glorietas

de Cuauhtémoc y Diana Cazadora sobrepasan el nivel B, que con base a ese criterio sería necesario realizar algún tipo de estudio epidemiológico.



Gráfica 4.14 Concentración Total de Cobre por Zona de Estudio.

4.4.5- Concentración de Plomo por Punto de Muestreo.

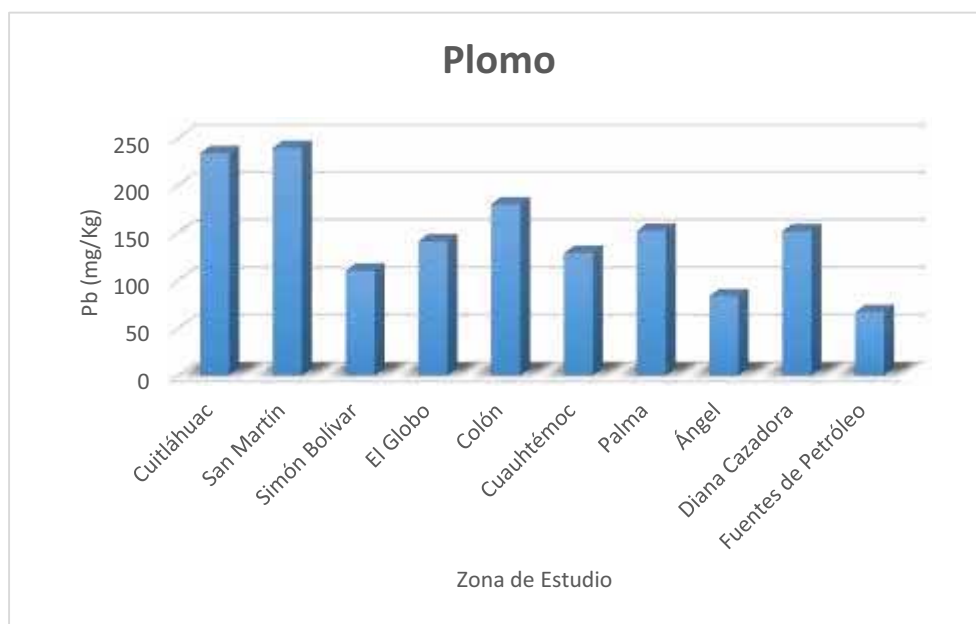
La gráfica 4.15 se presentan las concentraciones de plomo obtenidas de los polvos recolectados en la Avenida Paseo de la Reforma. Se observa que los niveles máximos de plomo se hallan en las glorietas de Cuitláhuac y San Martín. Por el contrario las concentraciones más bajas se encuentran en la glorieta de Fuentes de Petróleo y en el Ángel de la Independencia. Las elevadas concentraciones de plomo se deben al alto aforo vehicular, a la combustión de gasolina con tetraetilo de plomo, el desgaste de las llantas de automóviles, pastillas de frenos, etc.

Si consideramos los criterios de la norma 147 SEMARNAT (criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados con metales) las concentraciones de plomo se encuentran dentro del valor considerado para de uso residencial o agrícola.

De acuerdo con los criterios de calidad de suelos de Canadá y Holanda (*Ministry of Housing, 1991; Canadian Council of Minister of the Environment, 1991*), las glorietas de Cuitláhuac, San Martín, Colón, La Palma y Diana Cazadora sobrepasan el nivel B, que en base a ese criterio sería necesario realizar algún tipo de estudio epidemiológico. Asimismo, estos sitios se encuentran comprendidos en el límite de

seguridad de 200 a 500 mg Pb/kg establecidos por la EPA (1997) para la restauración de suelos.

La única glorieta que no sobrepasa el nivel STV (concentraciones deseadas o admisibles en el suelo) es la glorieta de Ángel de la independencia. Así mismo estos sitios no sobrepasan los límites permisibles en concentraciones de metales en polvos relacionados con efectos tóxicos a la salud (el límite de seguridad de 250 mg/kg propuestos por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos, EPA).



Gráfica 4.15 Concentración Total de Plomo por Zona de Estudio.

4.4.6- Concentración de Zinc por Punto de Muestreo.

Finalmente, las concentraciones de zinc para la avenida Paseo de la Reforma se muestran en la gráfica 4.16. Se observa que los niveles máximos de zinc se hallan en las en la glorieta de la Palma, así como también valores elevados para la glorieta de Cuitláhuac. Por el contrario las concentraciones mínimas se encuentran en la glorieta de Fuentes de Petróleo. Las elevadas concentraciones de zinc se deben al alto aforo vehicular, a las pastillas de freno, a los adictivos, fugas de aceite, la abrasión de piezas de automóviles, etc.



Gráfica 4.16 Concentración Total de Zinc por Zona de Estudio.

4.4.7.- Metales Totales de Otros Sitios.

En la tabla 4.5 se presentan los resultados de diversos estudios de la presencia de metales tóxicos en polvos de la calle, publicados por diferentes autores nacionales e internacionales incluyendo los resultados obtenidos de este estudio (avenida Paseo de la Reforma).

Tabla 4.5. Metales Tóxicos Presentes en Polvos en Diferentes Países.

Concentración promedio en mg/Kg					
	Cd	Pb	Cu	Zn	Fe
China (Qingjie, <i>et al.</i> , 2008)	-----	43	30	74	-----
Bangladesh (Rakib, <i>et al.</i> , 2014)	-----	67	98	144	-----
Nepal (Tamrakar, <i>et al.</i> , 2011)	6	35	-----	148	-----
Venezuela (Durán, <i>et al.</i> , 2006)	-----	2281	-----	-----	-----
Turquía (Tokatlioglu y Kardal, 2006)	12	415	85	443	16542
India (Banerje, 2003)	17	150	1350	353	
México Df (Elsa, 2012)	2	463	190	347	27008
México Df (Flores, 2013)	2	421	113	301	22848
Paseo de la Reforma (2015)	3	149	87	26	50055

Al comparar los resultados obtenidos por los diferentes autores proporciona una idea de los lugares, debido a los diferentes factores que influyen, como los particulares aforos vehiculares, las diferentes fuentes de los metales tóxicos de cada país. Es claro que la contaminación de hierro en la avenida Paseo de la Reforma de la Ciudad

de México se encuentran los niveles de concentración más elevados en comparación de Turquía, y de los dos sitios de la Ciudad de México muestreados en 2012 y 2013.

Por el contrario las concentraciones de cadmio en la Ciudad de México se encuentran con los niveles de concentración más bajas que en Nepal, Turquía y la India.

Comparando los resultados de plomo obtenidos para la Avenida Paseo de la Reforma, se observan concentraciones menores en otros países, China, Bangladesh y Nepal, pero mayores concentración reportadas para Venezuela, Turquía y las zonas de la Ciudad de México y con un nivel prácticamente similar con la India.

Finalmente para el zinc se observan concentraciones muy bajas en la avenida Paseo de la Reforma, en comparación de los resultados obtenidos por los diferentes autores, incluyendo los autores de la Ciudad de México.

4.5.- Concentración de Metales Totales, en los Polvos por Tamaño Granulométrico.

El tamaño de la granulometría de los sedimentos juega un papel importante en la distribución de los metales tóxicos, ya que los metales no se distribuyen homogéneamente en las diferentes fracciones de tamaño de grano. El tamaño es la característica más importante para determinar sus propiedades ópticas, de deposición y además de su tiempo de vida media en la atmósfera. También los efectos ambientales y en la salud dependen de éste patrón de distribución

Se determinó la concentración total de cada tipo de metal (Cd, Cu, Fe, Pb y Zn), en las muestras de polvo de tamaño de partícula de 1190, 250, 220 y 200 μm (Tabla 4.6.1), metales que se encuentran presentes en los polvos contaminados a lo largo de la avenida Paseo de la Reforma.

4.5.1.- Concentración de Metales Totales, en los Polvos de 250 < Part < 1190 μm .

En la tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos de la concentración total de cada tipo de metal, de los 10 puntos de muestreo, para polvos de tamaño de tamiz de 1190 Micrómetros.

Tabla 4.6 – Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos 250< Part <1190 µm.

Concentración en (mg/kg)						
Glorieta	Hierro	Zinc	Plomo	Cobre	Cadmio	de mayor a menor
Cuitláhuac	38281.2 ± 12	12.8 ± 0.1	123.1 ± 2.5	34.9 ± 4.7	3.5 ± 0.3	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
San Martín	37978.2 ± 7	145.6 ± 1.9	268.9 ± 0.9	88.4 ± 14.9	2.8 ± 0.3	Fe>Pb>Zn>Cu>Cd
Simón Bolívar	36262.6 ± 9.5	22.3 ± 2.8	327 ± 0.4	99.3 ± 16	1.8 ± 0.2	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
El Globo	21423.5 ± 8.3	27.2 ± 2	107.4 ± 7.8	34.8 ± 2.8	3.8 ± 0.4	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Colón	41514.6 ± 7.7	15.5 ± 2.1	95.1 ± 5.2	111.2 ± 5.8	3.9 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Cuauhtémoc	28427.3 ± 7.3	21.5 ± 3.3	44.8 ± 9.6	87.4 ± 7	4 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Palma	30726.9 ± 2.1	39.3 ± 1.1	105 ± 10.6	53.9 ± 6.3	4.8 ± 0.4	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Ángel	29799.3 ± 5.8	8.8 ± 1.2	43 ± 4.2	37.6 ± 2.3	4.2 ± 0.01	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Diana Cazadora	35944.6 ± 2	33.7 ± 1.6	70.9 ± 3.4	260.9 ± 5.3	4.8 ± 0.5	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Fuentes de Petróleo	16771.5 ± 9.1	33.9 ± 1.8	66 ± 28.9	60.5 ± 10	4.2 ± 0.3	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Promedio	31713	36.1	125.1	86.9	3.8	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd

4.5.2.-Concentración de Metales Totales, en los Polvos 220 de <Part< 250 µm.

En la tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos de la concentración total de metales tóxicos, de los 10 puntos de muestreo, para polvos de tamaño de 250 micrómetros.

Tabla 4.7 – Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos 200 < Part < 250 µm.

Concentración en mg/kg						
Glorieta	Hierro	Zinc	Plomo	Cobre	Cadmio	de mayor a menor
Cuitláhuac	21151.9 ± 6.1	9.7 ± 0.05	54.5 ± 2.9	31.6 ± 3.5	2.6 ± 0.3	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
San Martín	31612.6 ± 8.7	52.9 ± 2.8	64.1 ± 4.9	85.5 ± 9.4	6 ± 0.6	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Simón Bolívar	28953.9 ± 11.8	7.7 ± 0.2	91.6 ± 13.2	32.8 ± 0.05	4.8 ± 0.5	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
El Globo	20568.6 ± 12	17.1 ± 0.7	99.7 ± 6.5	73.4 ± 6.6	3.9 ± 0.08	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Colón	13988.4 ± 13	12.6 ± 0.3	55.3 ± 0.01	24.9 ± 2.7	3.1 ± 0.3	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Cuauhtémoc	15420 ± 7.8	12.3 ± 0.05	43.6 ± 6.7	71.7 ± 6.1	3.2 ± 0.4	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Palma	17747.6 ± 1.7	24.1 ± 0.2	41.5 ± 1.6	57.5 ± 5	3.6 ± 0.01	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Ángel	26200.1 ± 8.3	12.5 ± 0.7	45.6 ± 4	48.4 ± 6.2	3.9 ± 0.1	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Diana Cazadora	24832.5 ± 7.2	16.8 ± 1.2	45.3 ± 1.4	68.3 ± 6.8	3.2 ± 0.5	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Fuentes de Petróleo	26758.1 ± 13.9	8.6 ± 0.4	41.5 ± 3.1	21.9 ± 1	2.4 ± 0.2	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Promedio	22723.3	17.4	58.3	51.6	3.7	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd

4.5.3.- Concentración de Metales Totales, en los polvos de 200 <Part < 220 μm .

En la tabla 4.8 se presentan los resultados obtenidos de la concentración total de cada tipo de metal, de los 10 puntos de muestreo, para polvos del tamaño de tamiz de 220 micrómetros.

Tabla 4.8- Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos de 200 < Part < 220 μm .

Concentración en mg/kg						
Glorieta	Hierro	Zinc	Plomo	Cobre	Cadmio	de mayor a menor
Cuitláhuac	22959.4 \pm 2	9.6 \pm 1	50.6 \pm 5.2	41.4 \pm 3.9	0.9 \pm 0.1	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
San Martín	21297.2 \pm 12.5	49.4 \pm 1.1	38.5 \pm 1.3	74.9 \pm 4.5	1.4 \pm 0.1	Fe>Zn>Cu>Pb>Cd
Simón Bolívar	27039.6 \pm 4.3	10.8 \pm 0.1	39.9 \pm 0.7	37.5 \pm 4.8	1.5 \pm 0.09	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
El Globo	22452.1 \pm 5.6	21.9 \pm 0.1	50.2 \pm 4.5	61.3 \pm 2.9	1 \pm 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Colón	21054.3 \pm 7.8	12.9 \pm 1	47.6 \pm 4.5	32.4 \pm 1.3	1.1 \pm 0.004	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Cuauhtémoc	33072.4 \pm 11.2	19.6 \pm 0.4	39.2 \pm 2.7	121.3 \pm 9.3	0.9 \pm 0.06	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Palma	20515.1 \pm 8.7	15.6 \pm 0.3	39.9 \pm 3	35.1 \pm 4.8	1.1 \pm 0.1	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Ángel	15383.4 \pm 17.9	14.5 \pm 0.04	33 \pm 0.1	49.6 \pm 3.8	1 \pm 0.02	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Diana Cazadora	43604.1 \pm 15.6	8.8 \pm 0.1	38 \pm 2.3	35.9 \pm 2	0.8 \pm 0.08	Fe>Pb>Cu>Zn>Cd
Fuentes de Petróleo	27263.8 \pm 13	16.9 \pm 0.2	38.4 \pm 1	73.7 \pm 6.4	1.1 \pm 0.09	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Promedio	25464.1	18	41.5	56.3	1.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd

4.5.4.- Concentración de Metales totales, en Polvos de < 200 μm .

En la tabla 4.9 se presentan los resultados obtenidos de la concentración total de cada tipo de metal, de los 10 puntos de muestreo, para polvos de tamaño de tamiz de 200 micrómetros.

Tabla 4.9- Concentraciones de Metales Totales, Para Polvos de < 200 µm.

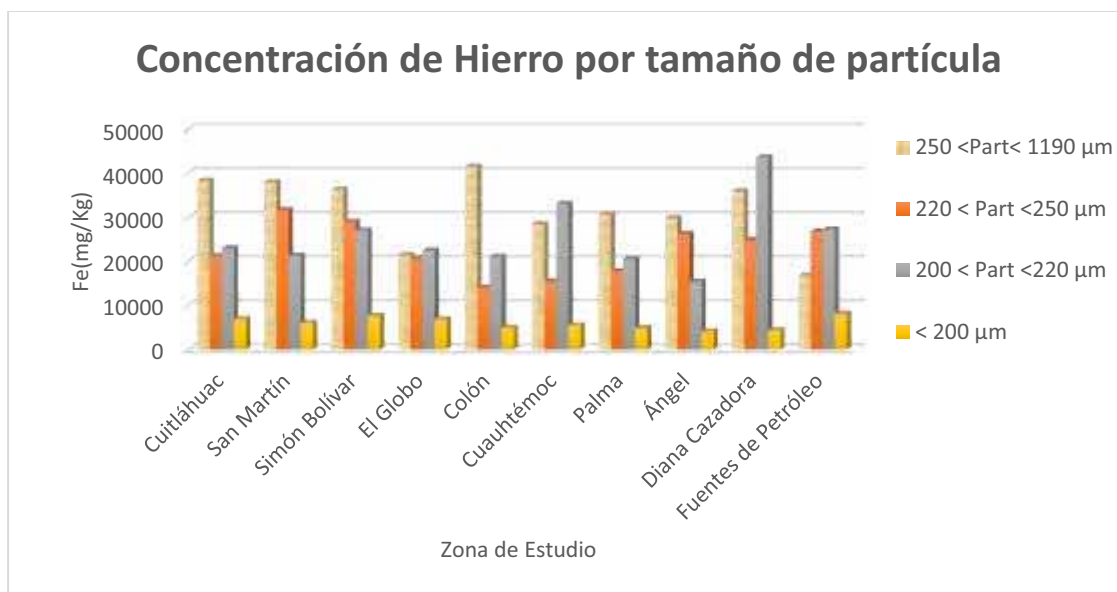
Concentración final mg/kg						
Glorieta	Hierro	Zinc	Plomo	Cobre	Cadmio	de mayor a menor
Cuitláhuac	6889.5 ± 9.6	11.6 ± 0.7	35.9 ± 2.5	58.3 ± 0.3	1.2 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
San Martín	6037.6 ± 4.2	55.2 ± 5	41.3 ± 1	134.6 ± 11.3	2 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Simón Bolívar	7662.3 ± 5.8	14.7 ± 0.8	30.6 ± 2.1	71.2 ± 4.9	1.1 ± 0.04	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
El Globo	6855.5 ± 3.9	15.8 ± 1.3	39.8 ± 2	104.1 ± 4.5	1.4 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Colón	4942.9 ± 4.4	14.1 ± 0.6	33.9 ± 0.03	40.1 ± 1.7	1.1 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Cuauhtémoc	5495.1 ± 8.7	12.9 ± 0.3	35.1 ± 0.8	93.8 ± 0.9	1.3 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Palma	4893.2 ± 6	13.3 ± 1	43.8 ± 5.5	43.1 ± 6	1.1 ± 0.08	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Ángel	4105.5 ± 10.3	16.4 ± 0.8	37.4 ± 4.8	56.6 ± 4.2	1 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Diana Cazadora	4378.2 ± 10	13.1 ± 0.6	43.6 ± 1.2	51.7 ± 4.7	1 ± 0.06	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Fuentes de Petróleo	8146.1 ± 7.3	9.5 ± 0.1	37.8 ± 0.009	57.5 ± 6.1	1.1 ± 0.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd
Promedio	5940.6	17.7	37.9 ±	71	1.1	Fe>Cu>Pb>Zn>Cd

En las gráficas anteriores se presentaron los resultados obtenidos por clase granulométrica de las muestras recolectadas. Las concentraciones en todos los puntos, muestran una mayor concentración de hierro; y en menor concentración en cadmio, este comportamiento es similar a los resultados de metales totales en donde las concentraciones de hierro son las más elevadas, y las concentraciones de cadmio en menor concentración.

4.6.- Concentración de Cada Tipo de Metal, en los Polvos por Tamaño Granulométrico.

4.6.1.- Concentración de Hierro, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico.

La gráfica 4.17 se muestra la concentración de hierro en los diferentes tamaños de partícula, en los diez puntos de muestreo.

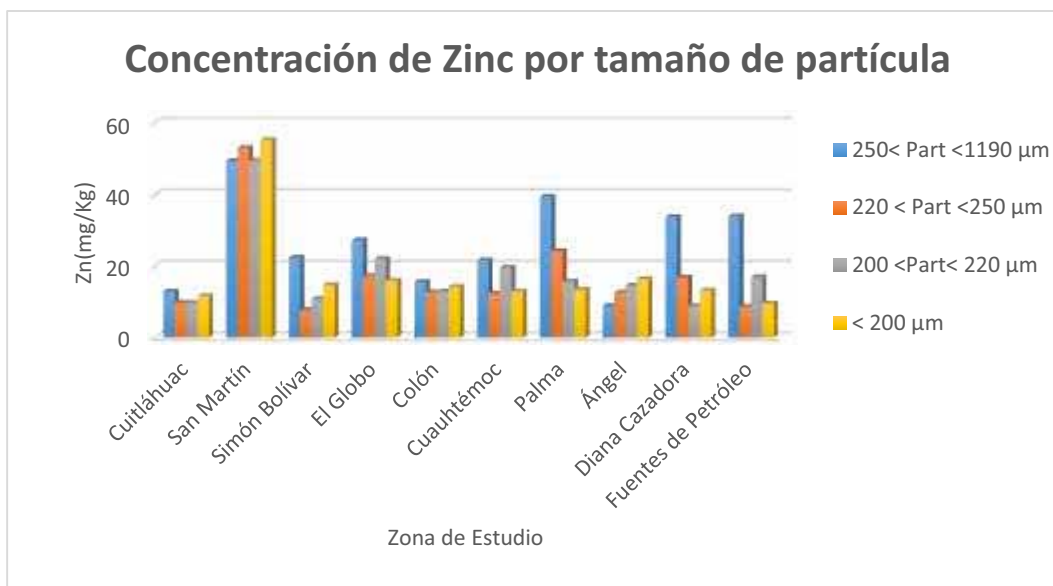


Gráfica 4.17 Concentración Total de Hierro por Tamaño de Partícula.

La gráfica 4.17 se presenta los resultados obtenidos de la concentración de hierro por tamaño de grano. Las mayores concentraciones de hierro se presentaron en las glorieta de Cuitláhuac, San Martín, Simón Bolívar, Colón, Palma y el Ángel en las partículas más grandes ($250 < \text{Part} < 1190 \mu\text{m}$). Encontrándose también valores elevados en la glorieta de la Diana Cazadora, Cuauhtémoc y Fuentes de Petróleo para el tamaño de partícula de $220 < \text{Part} < 250$ micrómetros, las menores concentraciones se encuentran en las partículas más pequeñas ($< 200 \mu\text{m}$), en todos los sitios de muestreo.

4.6.2.- Concentración de Zinc, en los Polvo de Diferentes Tamaños Granulométrico.

La gráfica 4.18 se muestra la concentración de zinc en los diferentes tamaños de partícula, en los diez puntos de muestreo.



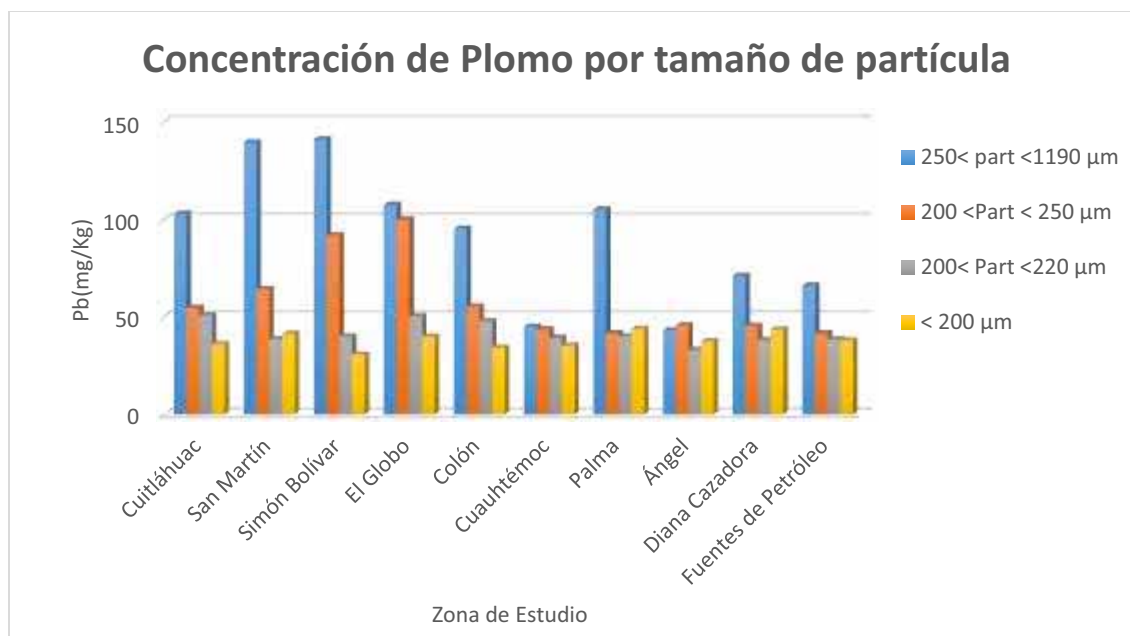
Gráfica 4.18 Concentración Total de Zinc por Tamaño de Partícula.

La gráfica 4.18 se presentan los resultados obtenidos de zinc para los polvos de diferente tamaño de partícula. Se observa una mayor concentración de zinc en la glorieta de San Martín en todos los tamaños de partícula, posiblemente al alto aforo vehicular. También se observa concentraciones elevadas de zinc para el tamaño de partícula $250 < \text{Part} < 1190 \mu\text{m}$ en las glorietas de la Palma, Diana Cazadora, Simón Bolívar y Fuentes de petróleo y en los demás sitios de muestreo sus concentraciones son homogéneas en los diferentes tamaños de partícula es decir la concentraciones se encuentran muy cercanas en todos los tamaños de partícula en cada punto de muestreo. Como se comentó anteriormente el zinc se atribuye a las pastillas de freno, fugas de aceite, la abrasión de piezas de automóviles y al alto flujo vehicular.

Este comportamiento es similar reportado por Nasser (2012) en polvos de carretera de tráfico intenso en donde las concentraciones de zinc son más elevadas en las partículas menores a 200 micrómetros.

4.6.3.- Concentración de Plomo, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico.

La gráfica 4.19 se muestra la concentración de plomo en los diferentes tamaños de partícula, en los diez puntos de muestreo.



Gráfica 4.19 Concentración Total de Plomo por Tamaño de Partícula.

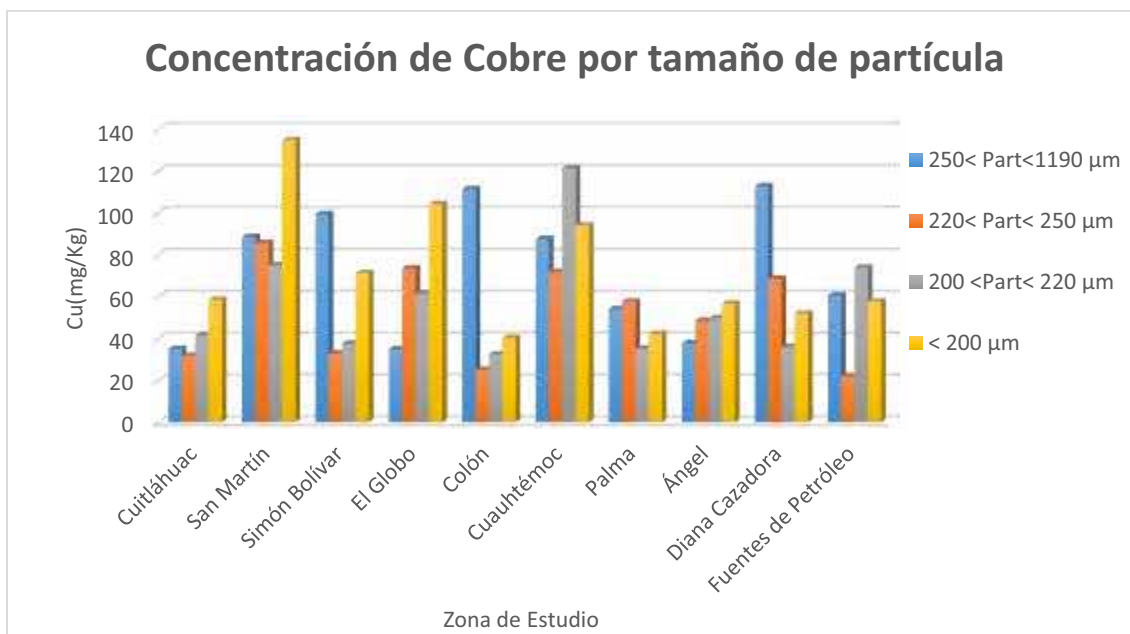
La gráfica 4.19 se presentan los resultados obtenidos de la concentración de plomo por tamaño de grano. Las mayores concentraciones de plomo se presentaron en las glorietas de Cuitláhuac, San Martín, Simón Bolívar, Globo, Colón, Palma, Diana Cazadora Simón Bolívar, el Globo y Fuentes de petróleo, en las partículas más grandes ($250 < \text{Part} < 1190 \mu\text{m}$). Las menores concentraciones se encuentran en las partículas más pequeñas (220 y $200 \mu\text{m}$).

La glorieta del Ángel y Cuauhtémoc, se puede observar que este metal se encuentra en concentraciones muy cercanas en todos los tamaños de partícula. Las elevadas concentraciones de plomo se debe al alto aforo vehicular, a la combustión de gasolina con tetraetilo de plomo, al desgaste de las llantas de automóviles, pastillas de frenos y al asfalto.

Este comportamiento es diferente al reportado por Nasser (2012) en polvos de carretera de tráfico intenso en donde las concentraciones de plomo son más elevadas en las partículas menores a 200 micrómetros, Ellis (1981) encontró que las concentraciones de plomo son más elevadas en las partículas menores a 250 micrómetros en polvos recolectados de la calle. Flores (1998) encontró un comportamiento similar en las concentraciones de plomo en las partículas más grandes de los polvos de estacionamientos.

4.6.4.- Concentración de Cobre, en los Polvos de Diferente Tamaño Granulométrico.

La gráfica 4.20 se muestra la concentración de cobre en los diferentes tamaños de partícula, en los diez puntos de muestreo.

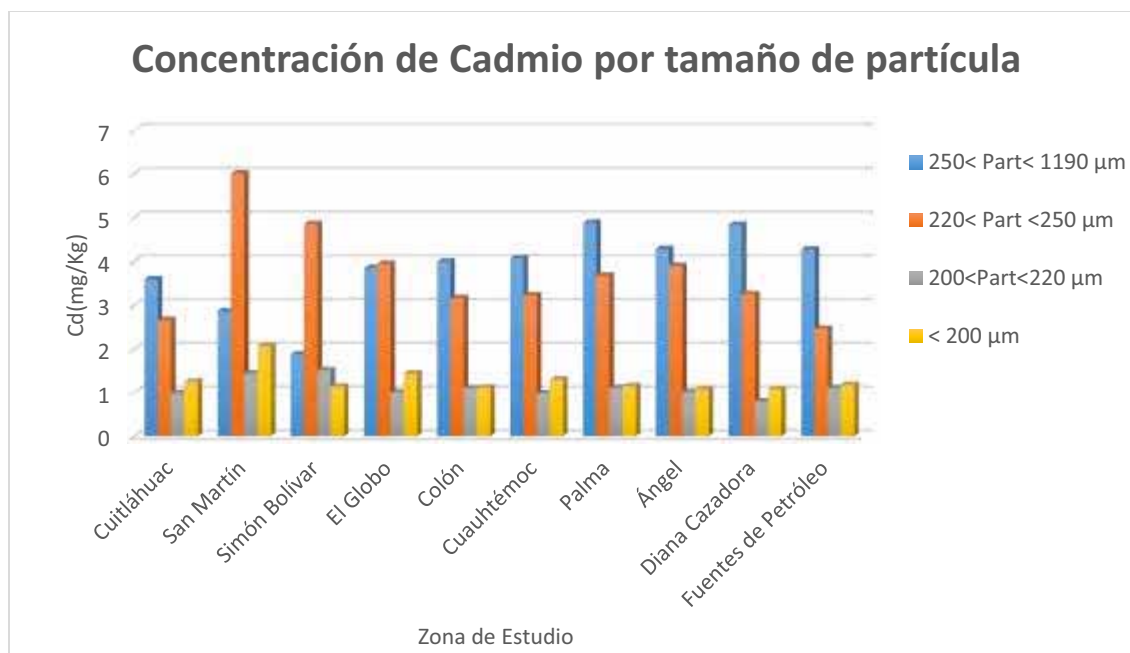


Gráfica 4.20 Concentración Total de Cobre por Tamaño de Partícula.

La gráfica 4.20 se presentan los resultados obtenidos para el cobre por tamaño de partícula. Se puede observar que no existe una tendencia definida de la concentración del cobre por su tamaño de partícula. Las mayores concentraciones de cobre se presentaron en las glorietas de San Martín y Cuauhtémoc en los diferentes tamaños de partículas. La presencia de cobre se asocia a la corrosión de componentes de automóviles, esmaltes, pigmentos, combustión de gasolina, etc.

4.6.5.- Concentración de Cadmio, en los Polvo de Diferente Tamaño Granulométrico.

La gráfica 4.21 se muestra la concentración de cadmio en los diferentes tamaños de partícula, en los diez puntos de muestreo.



Gráfica 4.21 Concentración Total de Cadmio por Tamaño de Partícula.

La gráfica 4.21 se presentan los resultados obtenidos de la concentración de cadmio por tamaño de grano. Las mayores concentraciones de cadmio se presentaron en las partículas más grandes ($220 < \text{Part} < 1190 \mu\text{m}$) en todos los puntos de muestreo. Las menores concentraciones se encuentran en las partículas más pequeñas (220 y $200 \mu\text{m}$), en todos los sitios de muestreo, estas partículas tienen un comportamiento muy homogéneo, es decir la concentraciones se encuentran muy cercanas en todos los puntos de muestreo.

La presencia de cadmio se asocia a la intensidad de tráfico, al desgaste de las piezas metálicas, el desgaste de las llantas de automóviles, pintura de señalización en asfalto, lubricantes, etc.

Este comportamiento es diferente al reportado por Nasser (2012) en polvos de carretera de tráfico intenso en donde las concentraciones de Cadmio se encontraron muy cercanas en los diferentes tamaños de partícula. Flores (1998) encontró el mismo comportamiento para cadmio en polvos de estacionamiento, las concentraciones se encontraron muy cercanas en los diferentes tamaños de partícula.

4.7.- Evaluación de la Movilidad de los Metales Tóxicos (BCR, Community Bureau of Reference).

Las muestras de polvos recolectadas en la avenida Paseo de la Reforma, en los diez puntos de muestreo, fueron tamizadas con malla de $250 \mu\text{m}$. A esos polvos se les realizó el método de Extracción Secuencial (BCR), que es una prueba basada en el

protocolo de extracción de cuatro etapas de iones metálicos, y se utiliza para determinar la relación entre la extracción de los iones con las fases gástricas e intestinales humanas, regulada bajo el marco de la Oficina Comunitaria de Referencias, (BCR) por sus siglas en inglés, por ello es muy común identificar a esta técnica sencillamente como el método BCR.

Este método tiene como objetivo realizar una simulación de la movilidad de los metales tóxicos en el aparato digestivo, que consiste en dividir secuencialmente el contenido total de los metales en estudio presentes en una muestra, en cuatro fracciones en orden de movilidad y peligrosidad decreciente:

Fracción ácido soluble (F1): simulación del estómago.

Fracción reducible (F2): simulación del intestino delgado.

Fracción oxidable (F3): simulación del intestino grueso.

Fracción residual (F4): simulación del recto.

4.7.1-Extracción Secuencial de Hierro.

A continuación en la tabla 4.10 y en la gráfica 4.22 se presentan los resultados de la extracción secuencial de hierro, mediante el método de BCR.

Tabla 4.10- Extracción Secuencial de Hierro.

Concentraciones de la Fracciones Residuales de Hierro (Fe) en mg/Kg				
Glorieta	Fracción Ácido Soluble (F1)	Fracción Reducible (F2)	Fracción Oxidable (F3)	Fracción Residual (F4)
Cuitláhuac	57.1 ± 6.4	1787.6 ± 39.2	1158.1 ± 33.6	25420.3 ± 3.17
San Martín	72.8 ± 12.1	589.6 ± 6.1	122.9 ± 4.1	38103.9 ± 8.4
Simón Bolívar	207 ± 8.9	1019.4 ± 47.2	77.3 ± 7.5	35157 ± 11.7
El Globo	1241.9 ± 38.2	3192.8 ± 25.5	58.9 ± 0.6	34464.9 ± 13.6
Colón	84.5 ± 7.3	1554 ± 36.5	1577.3 ± 1.8	26279.4 ± 10
Cuauhtémoc	1111.9 ± 73.6	ND	76 ± 10	57286.2 ± 12.9
Palma	125.7 ± 13.8	1694 ± 25.6	1411.7 ± 45.2	49901.6 ± 14.4
Ángel	353.9 ± 11.6	1689.3 ± 31.5	1315 ± 12.5	32849.3 ± 9.8
Diana Cazadora	87.8 ± 10.3	1103.9 ± 9.1	1003.2 ± 2.9	34418.6 ± 12.9
Fuentes de Petróleo	195.5 ± 18.6	1398.7 ± 44.2	166.7 ± 22.6	40017.1 ± 9.3

ND: No Detectado



Gráfica 4.22 Extracción Secuencial de Hierro.

La gráfica 4.22 y en la tabla 4.10 se presenta la concentración de hierro, para cada uno de los diez puntos de muestreo.

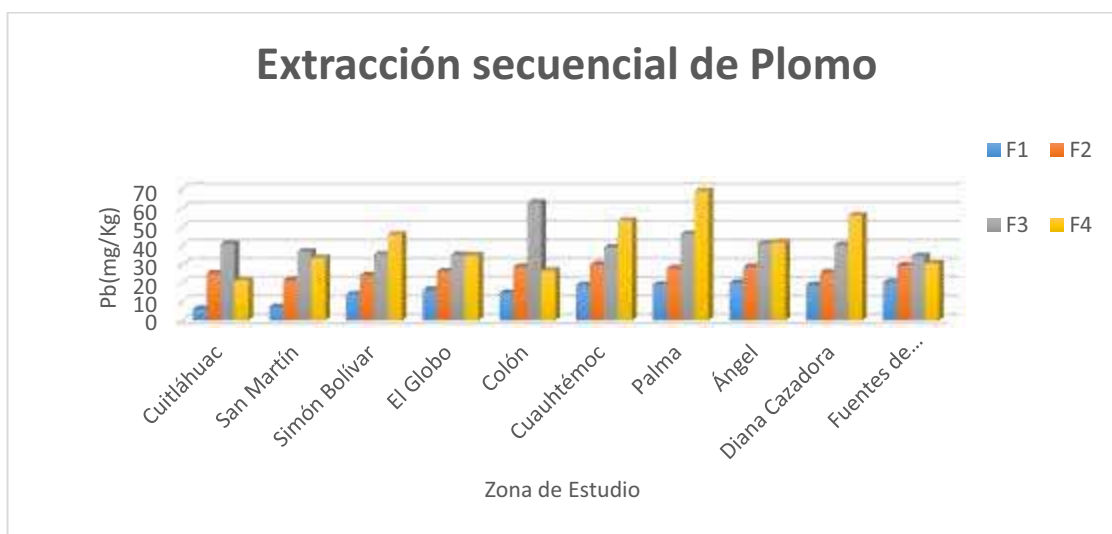
La fracción con mayor concentración de hierro es en la fracción residual (F4), la cual simula la fracción rectal del tracto digestivo. Por ello representando el menor riesgo en la salud ya que es extremadamente estable y este es eliminado. Por otra parte las fracciones con menor concentración, son la fracción reducible (F2): que simula al intestino delgado, la fracción oxidable (F3): que simula al intestino grueso y la fracción intercambiable (F1), que es una simulación del estómago, esta fracción puede representar una mayor riesgo para la salud.

4.6.2- Extracción Secuencial de Plomo.

A continuación en la tabla 4.11 y en la gráfica 4.23, correspondientes a los resultados de la extracción secuencial de plomo, mediante el método BCR.

Tabla 4.11- Extracción Secuencial de Plomo.

Glorieta	Concentraciones de las Fracciones Residuales de Plomo (Pb) en mg/Kg			
	Fracción Ácido Soluble (F1)	Fracción Reducible (F2)	Fracción Oxidable (F3)	Fracción Residual (F4)
Cuitláhuac	6 ± 0.8	25.2 ± 0.5	41 ± 0.6	21.4 ± 1.6
San Martín	7.1 ± 0.5	21.5 ± 1.3	36.8 ± 0.1	33.4 ± 0.6
Simón Bolívar	13.9 ± 1.1	24.1 ± 1.2	35.2 ± 4.7	45.9 ± 3.4
El Globo	16.3 ± 1.3	26.2 ± 3.4	35 ± 1.3	34.8 ± 1.5
Colón	14.6 ± 0.9	28.7 ± 2.1	63 ± 6.7	26.7 ± 3.5
Cuauhtémoc	19 ± 1.9	29.9 ± 4.3	39.1 ± 3.2	53.4 ± 4
Palma	19.1 ± 2.1	27.8 ± 2.8	46.2 ± 0.4	69.2 ± 3.8
Ángel	20.1 ± 2.1	28.7 ± 1.9	41 ± 3.8	41.8 ± 4.5
Diana Cazadora	18.9 ± 2.1	25.6 ± 3.4	40.4 ± 3.1	56.2 ± 6.8
Fuentes de Petróleo	20.4 ± 1.8	29.5 ± 4.6	34.3 ± 3	30.4 ± 3.4



Gráfica 4.23 Extracción Secuencial de Plomo.

La tabla 4.11 y la gráfica 4.23 se muestran las concentraciones de plomo en los diez puntos de muestreo, para simular su comportamiento en las diferentes zonas del tracto digestivo, realizado con el método BCR.

La fracción con mayor concentración de plomo se localiza en la fracción residual (F4), la cual simula el recto, representando el menor riesgo en la salud ya que este es eliminado fácilmente.

La fracción oxidable (F3): aunque también presenta concentraciones altas de este metal, al simular al intestino grueso representando un menor riesgo para la salud.

Mientras que la fracción con menor concentración de plomo es la fracción reducible (F2): la cual simula al intestino delgado y la fracción intercambiable (F1), simulación del estómago.

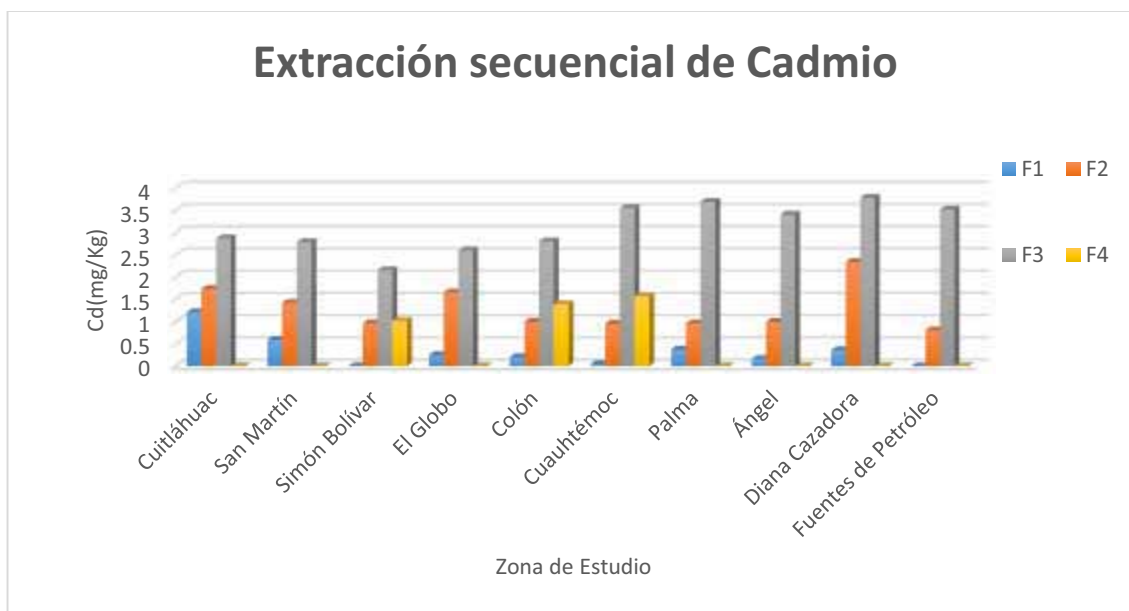
4.7.3-Extracción Secuencial de Cadmio.

La tabla 4.12 y la gráfica 4.24 se muestran las concentraciones de cadmio en los diez puntos de muestreo, para simular su comportamiento en las diferentes zonas del tracto digestivo, realizado con el método BCR.

Tabla 4.12- Extracción Secuencial de Cadmio.

Glorieta	Concentraciones de las Fracciones residuales de Cadmio (Cd)			
	Fracción Ácido Soluble (F1)	Fracción Reducible (F2)	Fracción Oxidable (F3)	Fracción Residual (F4)
Cuitláhuac	1.2 ± 1	1.7 ± 0.1	2.8 ± 0.4	ND
San Martín	0.5 ± 0.06	1.4 ± 0.1	2.7 ± 0.2	ND
Simón Bolívar	ND ±	0.9 ± 0.06	2.1 ± 0.1	1 ± 0.1
El Globo	0.2 ± 0.3	1.6 ± 0.1	2.6 ± 0.2	ND
Colón	ND	1 ± 0.07	2.8 ± 0.1	1.3 ± 0.1
Cuauhtémoc	ND	0.9 ± 0.07	3.5 ± 0.3	1.5 ± 0.01
Palma	0.3 ± 0.04	0.9 ± 0.04	3.7 ± 0.4	ND
Ángel	0.1 ± 0.02	1 ± 0.09	3.4 ± 0.3	ND
Diana Cazadora	0.3 ± 0.02	2.3 ± 0.2	3.7 ± 0.2	ND
Fuentes de Petróleo	ND	0.8 ± 0.05	3.5 ± 0.4	ND

ND: No Detectado



Gráfica 4.24 Extracción Secuencial de Cadmio.

La gráfica 4.12 y la tabla 4.24, se presenta la concentración de cadmio en los diez puntos de muestreo. Con las cuelas se realiza la simulando de las diferentes zonas del tracto digestivo, mediante el método BCR. Se observa que la fracción con mayor concentración de cadmio es en la fracción oxidable (F3): que simula al intestino grueso, lo cual implica un riesgo menor para la salud. Encontrándose también valores elevados para fracción reducible (F2): la cual simula al intestino delgado, esta fracción puede representar un mayor riesgo para la salud.

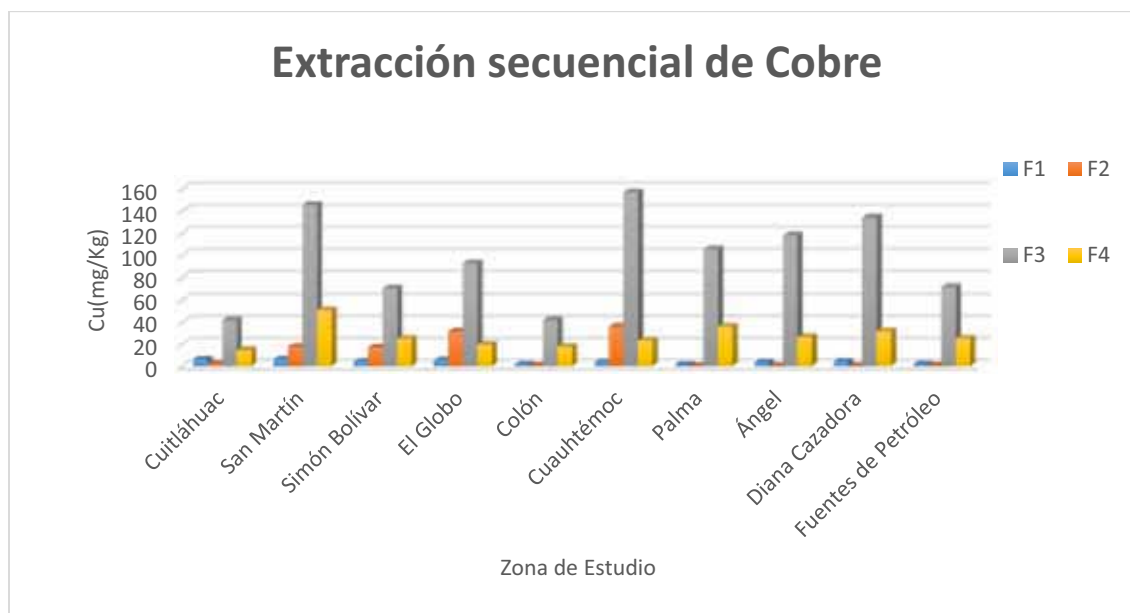
4.7.4.- Extracción Secuencial de Cobre.

La tabla 4.13 y la gráfica 4.25 se muestran las concentraciones de cobre en los diez puntos de muestreo, para simular su comportamiento en las diferentes zonas del tracto digestivo, realizado con el método BCR.

Tabla 4.13- Extracción Secuencial de Cobre.

Glorieta	Concentraciones de las Fracciones Residuales de Cobre (Cu)			
	Fracción Ácido Soluble (F1)	Fracción Reducible (F2)	Fracción Oxidable (F3)	Fracción Residual (F4)
Cuitláhuac	6 ± 0.4	ND	41.7 ± 2.7	14.6 ± 0.6
San Martín	6.1 ± 0.7	17.6 ± 1.4	145.8 ± 0.4	50.9 ± 5.5
Simón Bolívar	3.8 ± 0.3	16.8 ± 1.4	70.9 ± 5.7	25 ± 0.2
El Globo	5.3 ± 0.4	31.5 ± 1.5	92.4 ± 8.1	19.7 ± 1.9
Colón	1.1 ± 0.02	ND	41.9 ± 4.4	17.5 ± 2.2
Cuauhtémoc	3.2 ± 0.07	36.1 ± 2.5	157.1 ± 11.8	23.4 ± 1
Palma	1 ± 0.02	ND	105.1 ± 4.4	35.9 ± 3.5
Ángel	3.2 ± 0.1	ND	118 ± 2.7	26.6 ± 0.1
Diana Cazadora	4 ± 0.4	ND	134.2 ± 2.4	31.6 ± 2.3
Fuentes de Petróleo	2.4 ± 0.09	ND	72.1 ± 5	25.3 ± 1.6

ND: No Detectado



Gráfica 4.25 Extracción Secuencial de Cobre.

La gráfica 4.25 y en la tabla 4.13 se presenta la concentración de cobre, para cada uno de los diez puntos de muestreo y la simulación de las diferentes zonas del tracto digestivo realizado con el método BCR.

En la fracción con mayor concentración de cobre es en la fracción oxidable (F3): la cual simula el intestino grueso de tracto digestivo. Por ello representando un menor riesgo para la salud ya que es extremadamente estable y fácil de eliminar. Por otra

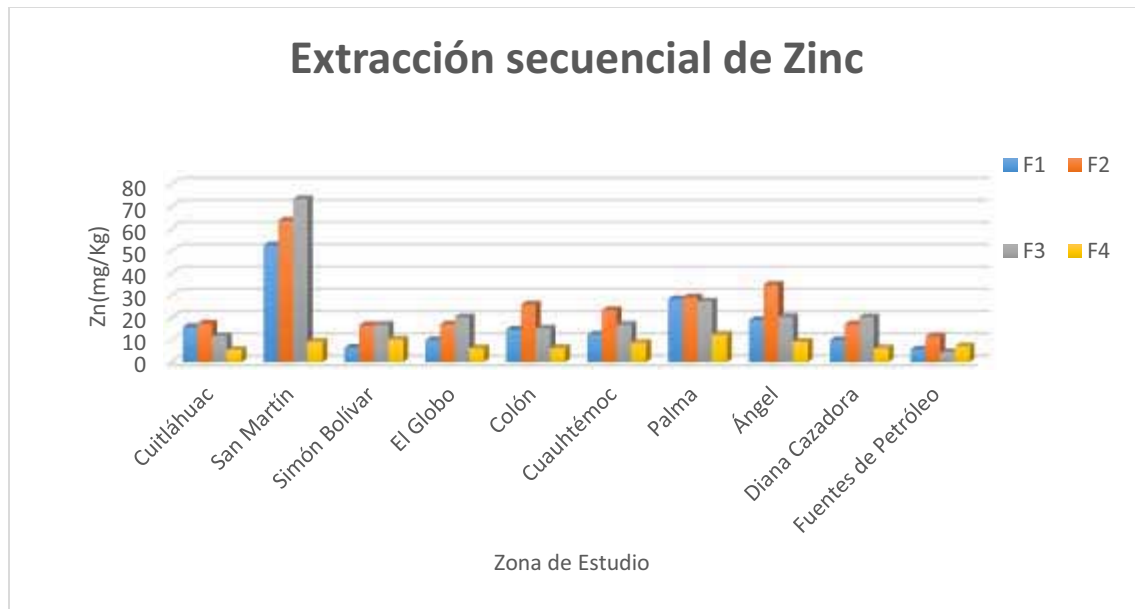
parte la fracción con menor concentración es la fracción reducible (F2): que simula el intestino delgado y la fracción intercambiable (F1), que simula al estómago. Encontrándose también valores elevados para fracción residual (F4), la cual simula el recto, representando el menor riesgo a la salud.

4.7.5.- Extracción Secuencial de Zinc.

La tabla 4.14 y la gráfica 4.26 se muestran las concentraciones de zinc en los diez puntos de muestreo, para simular su comportamiento en las diferentes zonas del tracto digestivo, realizado con el método BCR.

Tabla 4.14- Extracción Secuencial de Zinc.

Glorieta	Concentraciones de las Fracciones Residuales de Zinc (Zn)			
	Fracción Ácido Soluble (F1)	Fracción Reducible (F2)	Fracción Oxidable (F3)	Fracción Residual (F4)
Cuitláhuac	15.7 ± 1.9	17.3 ± 0.9	11.6 ± 0.4	5.5 ± 0.6
San Martín	52.6 ± 1.7	63.6 ± 2.2	73.3 ± 4.3	9.3 ± 0.7
Simón Bolívar	6.5 ± 0.6	16.6 ± 1.6	16.7 ± 1.6	10.2 ± 1
El Globo	9.8 ± 0.6	16.9 ± 0.2	20.2 ± 2	6.2 ± 0.4
Colón	14.6 ± 2	25.8 ± 2.8	15.1 ± 1.8	6.3 ± 0.5
Cuauhtémoc	12.3 ± 0.8	23.3 ± 2	16.8 ± 0.1	8.5 ± 0.8
Palma	28.3 ± 2.3	29.1 ± 4.9	27.2 ± 0.6	12.2 ± 1
Ángel	18.8 ± 2.4	34.7 ± 3.2	20.3 ± 0.4	9.1 ± 0.6
Diana Cazadora	9.8 ± 2.4	16.9 ± 0.6	20.2 ± 0.06	6.2 ± 0.5
Fuentes de Petróleo	5.7 ± 0.5	11.5 ± 0.6	4.4 ± 0.2	7.1 ± 05



Gráfica 4.26 Extracción Secuencial de Zinc.

La gráfica 4.26 y la tabla 4.14 se presenta la concentración de zinc en los diez puntos de muestreo y simulando las diferentes zonas del tracto digestivo realizado con el método BCR, y se observa que el punto con mayor concentración de zinc se encuentran en la glorieta de San Martín en las fracciones F1, F2 y F3. En los demás sitios las concentraciones de zinc es homogéneo en las diferentes fracciones y en la fracción con menor concentración es la fracción intercambiable (F1), la cual simula el estómago, esta fracción es considerada como las más peligrosa.

5.- Análisis de Resultados.

5.1.- Estadística de Metales Totales.

Los resultados de los análisis de metales totales han sido tratados estadísticamente, lo que incluye el cálculo de los parámetros fundamentales como la media aritmética, la desviación típica y los valores máximos y mínimos de cada variable. Este tipo de estadística fue realizada con el objetivo de establecer el grado de asociación entre variables analizadas. Para este estudio se consideró el número total de las muestras analizadas y los cinco metales tóxicos.

5.1.1.- Correlación de Spearman Para Metales Totales.

Se realizó el análisis de correlación de Spearman, para establecer si existe asociación entre los metales tóxicos. A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de esta correlación.

En la tabla 5.1 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas.

Tabla 5.1. Estadística Descriptiva por Metal.

Variables	Observaciones	Mínimo (mg/kg)	Máximo (mg/kg)	Media (mg/kg)	Desv. típica
Hierro	10	36734.6	64027	50055.7	8639
Zinc	10	10.3	44.2	25.9	10.6
Plomo	10	66.4	239.2	148.5	57.1
Cobre	10	45.5	128.3	86.5	24.3
Cadmio	10	2.9	5.2	3.4	0.6

La matriz muestra los coeficientes de correlación existentes entre todos los pares de variables tratadas. Cuando más próximo es el valor del coeficiente de correlación entre las dos variables a uno en valor absoluto, más se aproxima a una relación lineal. Un valor cercano a cero implica que las dos variables no están significativamente asociadas.

En la tabla 5.2 se muestra la matriz de correlación de Spearman, para las concentraciones de cada metal de sus respectivos 10 puntos de muestreo por glorieta (Tabla 4.4).

Tabla 5.2. Matriz de Correlación de Spearman entre Metales Tóxicos.

Variables	Hierro	Zinc	Plomo	Cobre	Cadmio
Hierro	1				
Zinc	0.12	1			
Plomo	0.61	0.62	1		
Cobre	0.66	0.10	0.35	1	
Cadmio	-0.4	-0.17	-0.22	-0.17	1

Los valores en negro demuestran buena correlación diferente de cero con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, del cual se encontró que existe una correlación entre el hierro-cobre (0.66) y zinc-plomo (0.62), tal como se aprecia en la tabla de correlaciones (tabla 5.2), las correlaciones fueron positivas y relativamente altas a mayor concentración de hierro mayor concentración de cobre. Mayor concentración de zinc mayor concentración de plomo.

Esto indica que las concentraciones de estos cuatro metales es producto de especies en fase gaseosa o sólida (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies metálicas, etc.) que muy probablemente provienen de las mismas fuentes (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies metálicas, etc.).

Mientras que de manera interesante el cadmio siempre mostró una correlación relativamente baja y negativa con los otros metales, que varió de -0.40 hasta -0.17, es decir a menor concentración de cadmio mayor concentración de cualquiera de los otros metales, de acuerdo con tabla de correlaciones, lo que puede ser un indicador importante del origen antropogénico.

5.1.2.-Análisis de Componentes Principales de Metales Totales.

Se Analizaron estadísticamente los datos de las concentraciones de metales totales por punto de muestreo (Tabla 4.4), a partir de un análisis no paramétrico de varianza de los 5 metales y cada metal es una variable, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y un valor de p-valor (bilateral) de 1.0.

Siendo el intervalo de confianza mayor al 99%, entonces se asume que las muestras provienen de la misma población, a pesar de las diferencias que existen en cada avenida.

Se presenta el análisis de componentes principales que es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número, perdiendo la menor cantidad de información posible. Con el objetivo de estimar las posibles fuentes de origen que afectan la concentraciones de los metales tóxicos en los sitios de muestreo

Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí.

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

Para este estudio se utilizó el análisis de componentes principales (ACP), que es una técnica utilizada para encontrar aquellas variables que no están correlacionadas entre sí (Componentes o Factores), e indica la varianza de las variables analizadas.

En la tabla 5.3 aparecen los valores propios de cada componente principal, y justo debajo la proporción de varianza explicada por cada uno de ellos y la varianza explicada acumulada.

Tabla 5.3 Componentes Principales o Factores de Metales.

	F1 (Hierro)	F2 (Plomo)	F3 (Cobre)	F4 (Zinc)	F5 (Cadmio)
Valor propio	2.458	1.136	0.854	0.416	0.136
Variabilidad (%)	49.152	22.727	17.082	8.317	2.721
% acumulado	49.152	71.879	88.961	97.279	100.000

Los datos de varianza explicada son muy importantes para saber cuántos componentes principales vamos a utilizar en nuestro análisis. No hay una regla definida sobre el número que se debe utilizar, con lo cual se debe decidir en función del número de variables iniciales (hay que recordar que se trata de reducirlas en la medida de lo posible y de la proporción de varianza explicada acumulada).

En este caso, parece razonable quedarse con los 2 primeros componentes principales, ya que con ellos se explica el 71.8% de la varianza, ya que estos dos factores recogieron el porcentaje de variabilidad que se considera suficiente.

Los datos de varianza consideran seis componentes iniciales, siendo el F1 hierro, el de mayor influencia por su alta aportación de varianza (49.08%). Mientras que los factores F2 plomo y F3 cobre aportan un 17.03% y 8.31% de varianza respectivamente: Por lo cual los factores F4 zinc, F5 cadmio son los de menor impacto en el análisis.

En la figura 5.1 se muestra la restricción del análisis a sólo 2 componentes principales, el F1 y el F2. Se esquematiza un plano canónico de 2 ejes, eje “X” F1 (49.08%) y eje “Y” F2 (17.03%), para el arreglo de los dos componentes principales seleccionados, F1 hierro y F2 plomo, por explicar casi el total de la variabilidad acumulada (71.88 %).

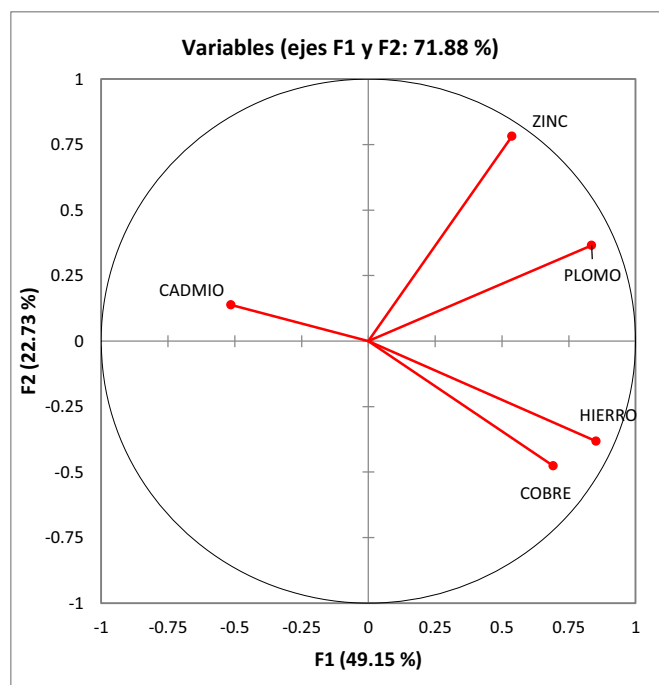
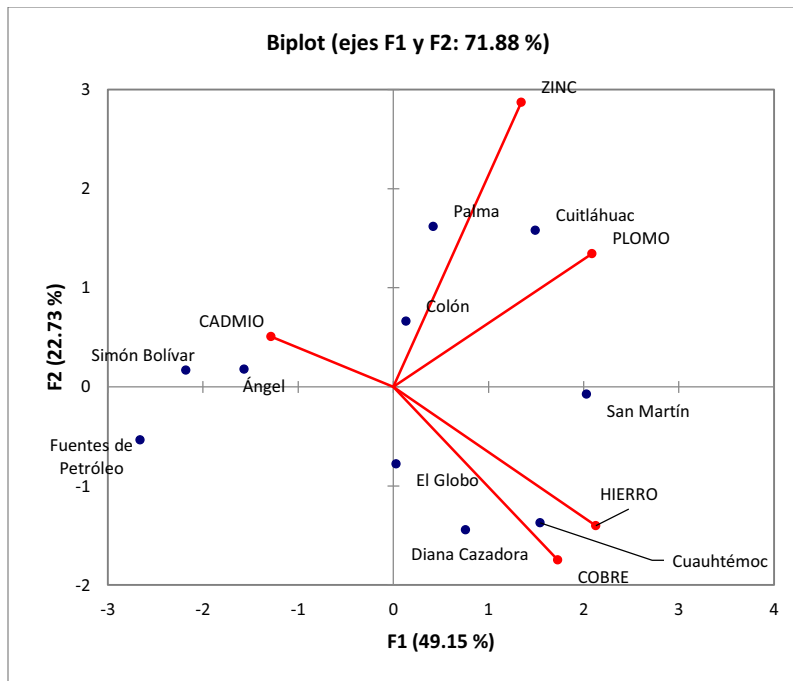


Figura 5.1. Plano Canónico entre Metales Totales , con una Distribución de Varianza (71.88 %) de los Factores F1 y F2.

Las correlaciones existentes entre las cinco variables originales, (hierro, plomo, cobre, zinc y cadmio) con sus propios ejes factoriales, especialmente el hierro y el cobre tienen la misma fuente de origen como se demuestra con la correlación de Spearman, a pesar de que las concentraciones máximas de metales son las del hierro y el plomo (Tabla 4.4).

En la gráfica 5.1 se muestra la distribución del 71.88 % de la varianza en sus dos ejes, y se establece la asociación de cada punto de muestreo.



Gráfica 5.1. Biplot de Correlación de Metales Tóxicos y de los Sitios de Estudio

Se observa que los puntos de muestreo Cuauhtémoc, Diana Cazadora y San Martín son los componentes que más directamente contribuyeron a conformar el 71.88% de la varianza, por estar más asociadas a los factores F1 hierro y F2 cobre, mientras que las glorietas Simón Bolívar y el Ángel fueron las que menos contribuyeron, ya que están más asociadas a la concentración del factor F5 cadmio.

5.1.3.- Correlación de Spearman Para Metales Totales y Flujo Vehicular.

Se realizó el análisis de correlación de Spearman, para establecer si existe una correlación entre los metales tóxicos y el flujo vehicular considerados en este estudio para cada sitio de muestreo. A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de esta correlación.

En la tabla 5.4 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas.

Tabla 5.4 Estadística Descriptiva por Metal y Flujo Vehicular.

Variable	Observaciones	Mínimo (mg/kg)	Máximo (mg/kg)	Media (mg/kg)	Desv. típica
Flujo vehicular Total por Glorieta	10	84	172	128.7	32
Hierro	10	36734.6	64027	50055.7	8639
Zinc	10	10.3	44.2	25.9	10.6
Plomo	10	66.4	239.2	148.5	57.1
Cobre	10	45.5	128.3	86.5	24.3
Cadmio	10	2.9	5.2	3.4	0.6

En la tabla 5.5 se muestra la matriz de correlación de Spearman, para las concentraciones de cada metal de sus respectivos 10 puntos de muestreo y el flujo vehicular total por glorieta.

Tabla 5.5 Matriz Correlación de Spearman. Para Cada Tipo de Metal y Flujo Vehicular Total.

Variables	Total por Glorieta	Hierro	Zinc	Plomo	Cobre	Cadmio
Flujo Vehicular total por Glorieta	1	0-.261	0.669	0.273	0.188	0.200

Los valores en negro demuestran buena correlación diferente de cero con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, en el cual se encontró que existe una correlación entre todos los pares de variables tratadas, tipo de metal y flujo vehicular, en donde se puede apreciar que la correlación más alta y con dirección positiva la representan el flujo vehicular con el zinc (0.669), a mayor flujo vehicular mayor concentración de zinc. Esto indica que aunque el zinc no es el metal de mayor concentración en la avenida Paseo de la Reforma (Tabla 4.4), es el que muestra mayor asociación al tráfico vehicular, por lo que es posible inferir que las concentraciones y el enriquecimiento de este metal se está dando en forma de polvos y como producto de factores intrínsecos al flujo vehicular, desgaste de especies metálicas, aceite de motor, anticongelante, partícula de mofle, partes corroídas de autos, etc.

5.1.4.- Análisis de Componentes Principales de Metales Totales y Flujo vehicular

Se Analizaron estadísticamente los datos de la concentración de metales totales y el flujo vehicular total, a partir de un análisis no paramétrico de varianza de los 5 metales y cada metal es una variable, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y un valor de p-valor (bilateral) de 1.0.

En la tabla 5.6 se muestran los valores propios de cada componente principal, y justo debajo la proporción de varianza explicada por cada uno de ellos y la varianza explicada acumulada.

Tabla 5.6 Componentes Principales o Factores por Metal y Flujo Vehicular Total.

	F1 (Hierro)	F2 (Plomo)	F3 (Cobre)	F4 (Zinc)	F5 (flujo vehicular total)	F6 (Cadmio)
Valor propio	2.514	1.742	0.915	0.602	0.162	0.066
Variabilidad (%)	41.892	29.032	15.245	10.030	2.701	1.100
% acumulado	41.892	70.924	86.169	96.199	98.900	100.000

En este caso, parece razonable quedarse con los 2 primeros componentes principales, ya que con ellos se explica el 70,9% de la varianza acumulada, ya que estos dos factores recogieron el porcentaje de variabilidad que se considera suficiente.

Los datos de varianza consideran seis componentes iniciales, siendo el F1 hierro, el de mayor influencia por su alta aportación de varianza (41.89%). Mientras que los factores F2 plomo y F3 cobre aportan un 29.03% y 15.24% de varianza respectivamente: Por lo cual los factores F4 zinc, F5 flujo vehicular y F6 cadmio son los de menor impacto en el análisis.

En la figura 5.2 se muestra la restricción del análisis a sólo 2 componentes principales, el F1 y el F2. Se esquematiza un plano canónico de 2 ejes, eje “X” F1 (41.89%) y eje “Y” F2 (29.03%), para el arreglo de los dos componentes principales seleccionados, F1 hierro y F2 plomo, por explicar casi el total de la variabilidad acumulada (70.92 %).

En el plano canónico se muestran los 2 factores (F1 hierro y F2 plomo) que aportan el 70.92 % de la varianza. También es posible apreciar que el zinc es el metal más asociado al flujo vehicular, confirmado también por la correlación de Spearman. Esto permite sugerir que las concentraciones de este metal en polvos tal vez sea producto de una fuente antropogénica producida directamente por todos los factores del flujo automotriz.

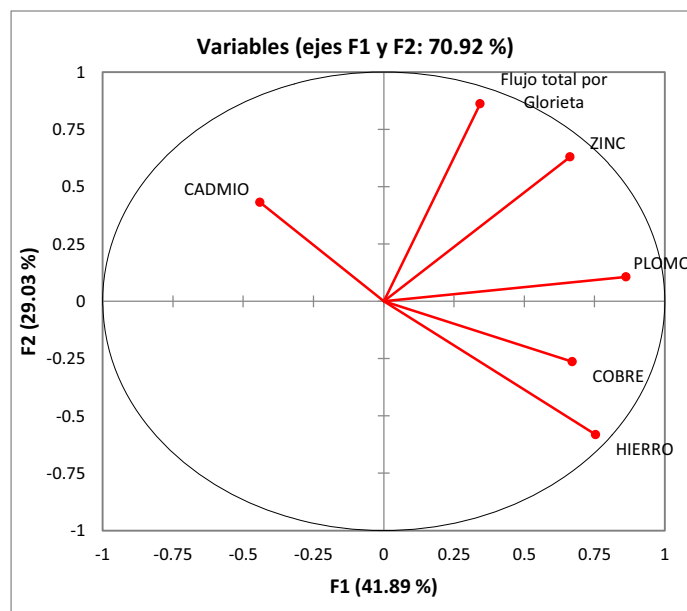
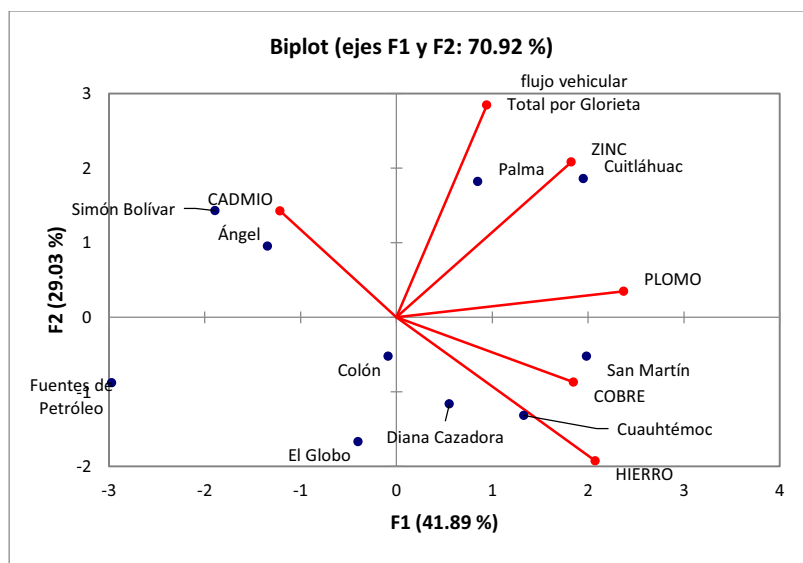


Figura 5.2. Plano Canónico Entre Metales Totales y Flujo Vehicular, con una Distribución de Varianza (70.92 %) de los Factores F1 y F2.

Las correlaciones existentes entre las seis variables originales, (hierro, plomo, cobre, zinc, cadmio y flujo vehicular total), con sus propios ejes factoriales, especialmente el hierro y el cobre tienen la misma fuente de origen como se demuestra con la correlación de Spearman. También es posible apreciar que el zinc es el metal más asociado al flujo vehicular, confirmado también por la correlación de Spearman (Tabla 4.2), a pesar de que la concentración máximas de metales son las del hierro y el plomo (Tabla 4.4).

En la gráfica 5.2 se muestra la asociación de correlación de los puntos de muestreo con el flujo vehicular, bajo la distribución de toda la varianza considerada (70.92%) aportados por primero y el segundo componente principal (F1 y F2).



Gráfica 5.2. Biplot de Correlación de Metales Tóxicos, Sitios de Estudio y Flujo Vehicular Total.

En esta gráfica se confirma que la correlación más alta que existe entre el zinc y el flujo vehicular esta también fuertemente asociada a los puntos de muestreo de la Glorieta de Cuitláhuac y La Glorieta de la Palma, ya que estos sitios presentan las concentraciones más elevadas de este metal (Tabla 4.4), así como también los flujos vehiculares más elevados (Tabla 4.2).

Otra correlación que se confirma es la que existe entre el cadmio con los puntos de muestreo de La Glorieta de Simón Bolívar y la Glorieta del Ángel de Independencia, ya que en estos dos puntos de muestreo se encuentran las más altas concentraciones de cadmio.

5.2.- Índices y Factores de Contaminación de Metales Totales.

5.2.1.- Factor de Enriquecimiento.

La contaminación por metales tóxicos en polvos, determinado mediante el factor de enriquecimiento (FE), se basa en los valores de la corteza terrestre (Tabla 5.7) reportados por Sparks (1995), y compara que tan enriquecidos o contaminados se encuentran los polvos recolectados en una muestra de polvo con los de la corteza terrestre.

Tabla 5.7. Concentración de Metales en la Corteza Terrestre (Sparks 1995).

Metal	Concentración (mg/Kg)
Fe	41,000
Cr	100
Cu	50
Cd	0.11
Pb	14
Zn	75

Este factor de enriquecimiento se calcula por medio de la ecuación (2):

$$FE = \frac{(X / Fe)_{polvo}}{(X / Fe)_{corteza}} \quad (2)$$

Donde:

X_{polvo} = representan la concentración del metal a analizar.

Fe_{polvo} = representan la concentración obtenida de hierro.

$(X/Fe)_{polvo}$ y $(X/Fe)_{corteza}$ indican una relación entre la corteza terrestre del elemento X con relación al hierro proveniente de los polvos que se encuentran sobre la superficie del asfalto y el promedio del elemento presente en la corteza terrestre respectivamente. Los elementos de referencia aplicables para este tipo de estudios son aquellos cuya naturaleza geoquímica permite que sus cantidades sustanciales no produzcan efectos de antagonismo o sinergismo con los elementos examinados (Aikpokpodion, 2010). Los elementos de referencia más empleados son: aluminio, escandio, manganeso y hierro (Poissant, *et al.*, 1994).

En la tabla 5.8, se presentan los factores de enriquecimiento de la muestra de polvo para cada punto de muestreo de la avenida Paseo de la Reforma.

Tabla 5.8. Factores de Enriquecimiento de las Muestras de la Avenida Paseo de la Reforma.

Glorieta	Factor de Enriquecimiento			
	Plomo	Cobre	Zinc	Cadmio
Cuitláhuac	13.6	1.6	0.4	27.5
San Martín	10.9	1.1	0.2	18.6
Simón Bolívar	7.3	1.3	0.2	44.2
El Globo	8	1.3	0.2	21.7
Colón	10.5	1.1	0.3	24.1
Cuauhtémoc	5.8	1.5	0.2	18.6
Palma	10	1.4	0.5	24.9
Ángel	6.6	1.7	0.3	32.7
Diana Cazadora	8.6	2.0	0.2	23.9
Fuente de Petróleo	4.4	0.8	0.1	31.4
Total	85.9	14.2	2.9	267.8

De acuerdo con los resultados, la contaminación indicada por el Factor de Enriquecimiento para cada uno de los de los metales evaluados, se presenta en el siguiente orden: Cd>Pd>Cu>Zn.

En la Tabla 5.9, se presentan las categorías del factor de enriquecimiento propuestos por Lawson y Winchester (1979), para interpretar los niveles de impacto de los valores de concentración de los metales tóxicos en polvos.

Tabla 5.9. Clasificación del Factor de Enriquecimiento (FE) Lawson y Winchester (1979).

Categorías de FE	Origen del Elemento X (Metal Tóxico)
FE < 10	De la roca madre
10 < FE < 500	Moderadamente enriquecimiento, e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre.
500 < FE	Indica un alto enriquecimiento y muestra que existe una grave contaminación de origen antropogénicos.

De acuerdo con los resultados de la tabla 5.8 y aplicando el criterio propuesto por Lawson y Winchester (1979), se observa que el cadmio, se encuentra dentro del intervalo (10 – 500), en todos los puntos de muestreo por lo que este metal está moderadamente enriquecido e indica una fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre, mientras que el zinc y cobre se encuentran dentro del intervalo (FE < 10) en todos los puntos de muestreo el cual indica que provienen de la roca madre. Y finalmente para el plomo se encuentra dentro del intervalo (FE < 10) el cual indica que proviene de la roca madre, pero sólo en las glorietas de Simón Bolívar, el Globo,

Cuauhtémoc, Ángel, Diana Cazadora y Fuentes de petróleo. Mientras que las glorieta de Cuitláhuac, Palma, San Martín y Colón se encuentran dentro del intervalo (10- 500) por lo que estas glorieta están moderadamente enriquecidas e indican una fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre, ya que estas glorieta presentan un alto flujo vehicular. Este comportamiento fue similar en cadmio y plomo, reportado por Nasser (2012), Flores (2011) y Bergues (2011), indicando que estos metales están moderadamente enriquecidos en el suelo por fuentes antropogénicas.

5.2.2.- Índice de Geoacumulación.

En el caso de los polvos no existe esta forma de evaluar el grado de contaminación, sin embargo se utiliza este índice para los procedimientos aplicados en sedimentos propuestos por Müller (1969), los resultados obtenidos por este método se muestran en la Tabla 5.10, y se calcula por la siguiente ecuación (1):

$$I_{geo} = \log_2 (C_s / (1.5C_b)) \quad (1)$$

Donde C_s es la concentración del metal en estudio y C_b es el valor de referencia (de la corteza terrestre), y el factor 1.5 sirve para minimizar las posibles variaciones en los valores básicos para un metal dado en el entorno, así como muy pequeñas influencias antropogénicas.

Tabla 5.10. Índice de Geoacumulación.

Glorieta	Índice de Geoacumulación (I_{geo})				
	Plomo	Hierro	Cobre	Zinc	Cadmio
Cuitláhuac	6.3	2.6	3.2	1.5	7.4
San Martín	6.4	2.9	3.1	0.8	7.1
Simón Bolívar	5.3	2.4	2.9	0.3	7.8
El Globo	5.6	2.6	3.1	0.3	7
Colón	6	2.6	2.7	0.9	7.2
Cuauhtémoc	5.5	2.9	3.6	0.8	7.2
Palma	5.7	2.4	3	1.5	7.1
Ángel	5	2.1	3	0.7	7.2
Diana Cazadora	5.7	2.6	3.7	0.2	7.2
Fuentes de Petróleo	4.5	2.4	2.2	-0.5	7.4
Total	56.2	25.9	30.6	6.7	72.8

Como se puede apreciar en los resultados de la tabla 5.10, el cadmio es el que presenta el mayor valor de enriquecimiento y con menor concentración el zinc. Los valores negativo para el zinc en la glorieta Fuentes de Petróleo, de acuerdo a la clasificación de Müller (1969), indica que no existe contaminación para el zinc, es

decir, no hay grado de contaminación en esta glorieta. En general los I_{geo} de los metales calculados presentan el siguiente orden decreciente, $Cd > Pd > Fe > Cu > Zn$.

En la tabla 5.11 se muestran los valores de interpretación cuantitativa y cualitativa, de los índices de contaminación I_{geo} , que se obtienen de las muestras de polvos. Este índice proporciona una escala de siete grados de calidad de contaminación, que van desde la clase cero (I_{geo} de 0) para sedimentos no contaminados hasta la clase seis ($I_{geo} > 5$) para sedimentos extremadamente contaminados.

Tabla 5.11. Clasificación de los Índices de Geoacumulación.

Nivel de I_{geo}	Intervalo de I_{geo}	Grado de Contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado.
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado.
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado.
3	$2 < I_{geo} < 3$	De moderado a fuertemente contaminado.
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado.
5	$4 < I_{geo} < 5$	De fuertemente contaminado a extremadamente contaminado.
6	$5 < I_{geo}$	Extremadamente contaminado.

En esta tabla se aprecia el comportamiento de los niveles de contaminación de metales en las diez glorietas muestreadas, con base en su I_{geo} , se clasifican de la siguiente manera:

Nivel 6 extremadamente contaminado por cadmio y plomo en todos los puntos de muestreo con excepción de la glorieta de Fuentes de Petróleo.

Nivel 5 de fuertemente contaminado a extremadamente contaminado por plomo sólo en la glorieta de Fuentes de Petróleo.

Nivel 4 fuertemente contaminado por cobre (Cuitláhuac, San Martín, el Globo, Cuauhtémoc, Palma, Ángel y Diana Cazadora).

Nivel 3 moderadamente a fuertemente contaminado por hierro (las diez glorietas).

Nivel 2 moderadamente contaminadas por zinc (San Martín, Simón bolívar, el Globo, Colón, Cuauhtémoc, Ángel y Diana Cazadora)

Este comportamiento fue similar en plomo, reportado por Nasser (2012), Tamrakar (2011) pero con un comportamiento diferente en zinc, ya que estos autores reportan que el zinc está formando por el grupo seis (extremadamente contaminado). Al observar los resultados obtenidos por los diferentes autores es difícil de comparar los resultados directamente debido a diferencias importantes entre aforos vehiculares, así como las diferentes fuentes de contaminación de metales tóxicos y los diferentes sitios de muestreo (parques, zona habitacional, zona industriales, avenidas, estacionamientos etc.)

5.2.3.- Factor de Contaminación y Grado de Contaminación.

Otros índices para evaluar el grado de contaminación en los polvos es por medio del Factor de Contaminación y el Grado de Contaminación, ambos índices consideran los valores de la corteza terrestre reportados en las tablas 5.13 y 5.14, para realizar una comparación de que tan enriquecidos o contaminados se encuentran los polvos analizados.

El Factor de Contaminación (Cf) se calcula con por medio de la ecuación (3).

$$Cf = Cs / Cb \quad (3)$$

Cs es la concentración medida del metal examinado en el polvo de la avenida y Cb es la concentración de fondo geoquímico o valor de referencia del metal o el valor de fondo de metales tóxicos en el suelo no contaminado.

El Grado de Contaminación ayuda a conocer de manera general el grado de contaminación que puede tener un suelo, se calcula como la sumatoria de los factores de contaminación (Cf) obtenidos para cada metal analizado y su expresión matemática (4) es:

$$Cd = \sum Cf \quad (4)$$

En la tabla 5.12, se muestran los resultados obtenidos para el Factor de Contaminación y Grado de Contaminación de las diferentes glorietas de la Avenida Paseo de la Reforma.

Tabla 5.12. Factor de Contaminación y Grado de Contaminación Obtenidos Para los Diez Puntos de Muestreo.

Glorieta	Factor de contaminación (Cf)				
	Plomo	Cobre	Zinc	Hierro	Cadmio
Cuitláhuac	16.6	1.9	0.5	1.2	33.5
San Martín	17	1.7	0.3	1.5	29
Simón Bolívar	7.8	1.4	0.2	1	47.1
El Globo	10	1.7	0.2	1.2	27.2
Colón	12.8	1.3	0.3	1.2	29.5
Cuauhtémoc	9.1	2.4	0.3	1.5	29
Palma	10.8	1.5	0.6	1.1	27.6
Ángel	6	1.6	0.3	1	29.3
Diana Cazadora	10.8	2.5	0.2	1.2	30
Fuentes de Petróleo	4.8	1	0.1	1	33.5
Grado de contaminación (Cd)	106	17.32	3.4	12.2	31

Hakanson (1980) sugiere cuatro clases de contaminación para evaluar e interpretar los valores obtenidos del Factor de Contaminación de metales, tabla 5.13.

Tabla 5.13. Rangos de los Factores de Contaminación, Hakanson (1980).

Factor de contaminación	Rango
Bajo	$Cf < 1$
Moderado	$1 \leq Cf \leq 3$
Considerable	$3 \leq Cf < 6$
Muy alta	$6 \leq Cf$

Asimismo para este estudio se usaron cuatro clases para interpretar los valores obtenidos del Grado de Contaminación (Cd) (Duong y Lee, 2011) con base en tabla 5.14 mostrada a continuación:

Tabla 5.14. Rango para el Grado de Contaminación (Doong y Lee, 2011).

Grado de Contaminación	Rango
Bajo	$Cd < 5$
Moderado	$5 \leq Cd \leq 10$
Considerable	$10 \leq Cd < 20$
Muy alta	$20 \leq Cd$

Los factores de contaminación indican un factor muy alto de contaminación en cadmio y plomo, con excepción de la glorieta de Fuentes de Petróleo, esta excepción es por el bajo flujo vehicular que tiene esta glorieta. Las concentraciones de cobre y hierro se clasifican como un grado moderado en todos los puntos de muestreo y se observa que el zinc, se clasifica como un grado bajo contaminación en los diez puntos de muestreo.

Evaluando el grado de contaminación, las concentraciones de zinc, se consideran de bajo grado, mientras al cadmio y plomo se le considera como de grado alto de contaminación, al hierro y al cobre se le considera de un grado considerable de contaminación. Estos dos índices de contaminación confirmaron altos grados de contaminación en plomo y cadmio y bajos grados de contaminación en zinc. Este comportamiento fue similar en plomo y cadmio, reportado por Nasser (2012), pero con un comportamiento diferente en zinc.

5.2.4.- Factor Potencial de Riesgo Ecológico.

El Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI) propuesto por Hakanson (1980), evalúa el efecto negativo que los metales tóxicos pueden generar en un entorno ecológico. Este factor está formado por tres módulos básicos: el Factor de contaminación (Cf),

Factor Tóxico-Respuesta (Er) y el Potencial Índice de Riesgo Ecológico y se calculan por medio de las ecuaciones (5) y (6):

$$Er = Tr \times Cf \quad (5)$$

$$RI = \sum Er \quad (6)$$

Hakanson (1980) propuso que los valores de Tr para los metales Cd, Cr, Ni, Pb, Zn, Cu y As, son de 30, 2, 3, 5, 1, 5 y 10, respectivamente.

En la tabla 5.15 se presentan los resultados del Factor potencial de Riesgo Ecológico (RI), a partir de la sumatoria de todos los valores Er en los diez puntos de muestreo.

Tabla 5.15. Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI).

Glorieta	Factor Tóxico Respuesta (Er)			
	Plomo	Cobre	Zinc	Cadmio
Cuitláhuac	66.7	9.7	0.5	1005.6
San Martín	68.3	8.8	0.3	872
Simón Bolívar	31.4	7.3	0.2	1415.3
El Globo	40.3	8.7	0.2	815.9
Colón	51.4	6.7	0.3	885.1
Cuauhtémoc	36.7	12	0.3	872.4
Palma	43.4	7.8	0.6	829.5
Ángel	23.73	7.9	0.3	880.1
Diana Cazadora	43.3	12.8	0.2	898.9
Fuentes de Petróleo	19	4.5	0.1	1005.4
Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI)	424.3	86.6	3.4	9480.5

Para interpretar y valorar los resultados obtenidos del Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI) (Hakanson 1980; Zhu *et al*, 2008), se consideraron los niveles de riesgo, indicados en la tabla 5.16, para determinar el grado de contaminación en cada punto de muestreo.

Tabla 5.16 Niveles de Contaminación de Acuerdo a los Valores del Factor Potencial de Riesgo Ecológico (RI) (Hakanson 1980; Zhu *et al*, 2008)

Niveles de contaminación para los valores del Factor Potencial de Riesgo Ecológico					
	Bajo	Moderado	Considerable	Alto	Significantemente alto
RI	<110	110-220		220-440	>440

El nivel de contaminación del Potencial de Riesgo ecológico (RI) total, se obtuvo mediante la sumatoria de todos los Factores Tóxico Respuesta (Er), para cada tipo de metal.

El cadmio osciló entre 815 -1415 y de acuerdo con la tabla de niveles de contaminación (Tabla 5.16) se encuentra en un nivel significativamente alto. Los metales de zinc, plomo y el cobre son considerados de bajo potencial de riesgo ecológico.

5.2.5.- Resumen de los índices de contaminación.

Para evaluar el grado de contaminación o enriquecimiento de metales tóxicos (Fe, Cd, Pb y Zn), que se encuentran asociados a los polvos muestreados en las diez glorietas de la avenida Paseo de la Reforma de la Ciudad de México, se emplearon técnicas geoquímicas, las cuales permiten determinar y evaluar el grado de contaminación y enriquecimiento de dichos metales, así como interpretar y determinar su origen.

Los índices utilizados son los siguientes, el Factor de Contaminación, el Índice de Geocumulación, el Factor de Contaminación, el Grado de Contaminación, el Factor de Enriquecimiento y el Factor Potencial de Riesgo Ecológico.

En la tabla 5.17 se muestra un resumen de los resultados totales de los cinco índices de contaminación utilizados.

Tabla 5.17 Índices de Contaminación Calculados.

Índices y Factores	Grado de contaminación	
Factor de Enriquecimiento	Cd y Pb Moderadamente enriquecidos e indica otra fuente de enriquecimiento adicional a la roca madre	Cu y Zn origen de la roca madre
Índice de Geoacumulación	Cd y Pb indican Extremadamente contaminados	Zn indica no contaminado o moderadamente contaminado
Factor de Contaminación	Cd y Pb alto grado de contaminación	Zn bajo grado de contaminación
Grado de contaminación	Cd y Pb alto grado de contaminación	Zn bajo grado de contaminación
Factor Potencial de Riesgo Ecológico	Cd significativamente alto	Zn, Cu y Pb bajo

*Grado de contaminación altos o bajos pero no en todos los sitios de muestreo

Es importante mencionar que el índice de geocumulación no se puede comparar con otros índices porque involucra una función logarítmica y un factor de 1.5 el cual se utiliza para minimizar el efecto de las posibles variaciones en los niveles de referencia.

De manera muy general los índices apuntan a una contaminación alta o moderada de plomo y cadmio, mientras que el zinc muestra una contaminación baja o nula. Por su parte el Factor de Potencial de Riesgo Ecológico indica que existe una discrepancia en los valores del Pb, ya que el Factor de Contaminación es bajo, a pesar de que mostró elevadas concentraciones en todos los puntos de muestreo y desde luego representa a un elemento muy abundante y ampliamente distribuido.

5.3.- Extracción Secuencial de Metales (BCR).

5.4.- Factor de Movilidad (FM).

El factor de movilidad (FM) se calcula como un índice relativo entre las concentraciones de cada metal en la fracción ácido soluble F1 (Tabla 4.10 a 4.14) asociado con los carbonatos y la sumatoria de las demás fracciones (F2, F3 Y F4) esto para cada metal. El factor describe el potencial de la movilidad y se calcula con la siguiente ecuación 7:

$$FM = \left(\frac{F1}{F1 + F2 + F3 + F4} \right) \times 100 \quad (7)$$

Donde:

F1 = Resultados de la fracción ácido soluble, mg/kg

F2 = Resultados la fracción reducible, mg/kg

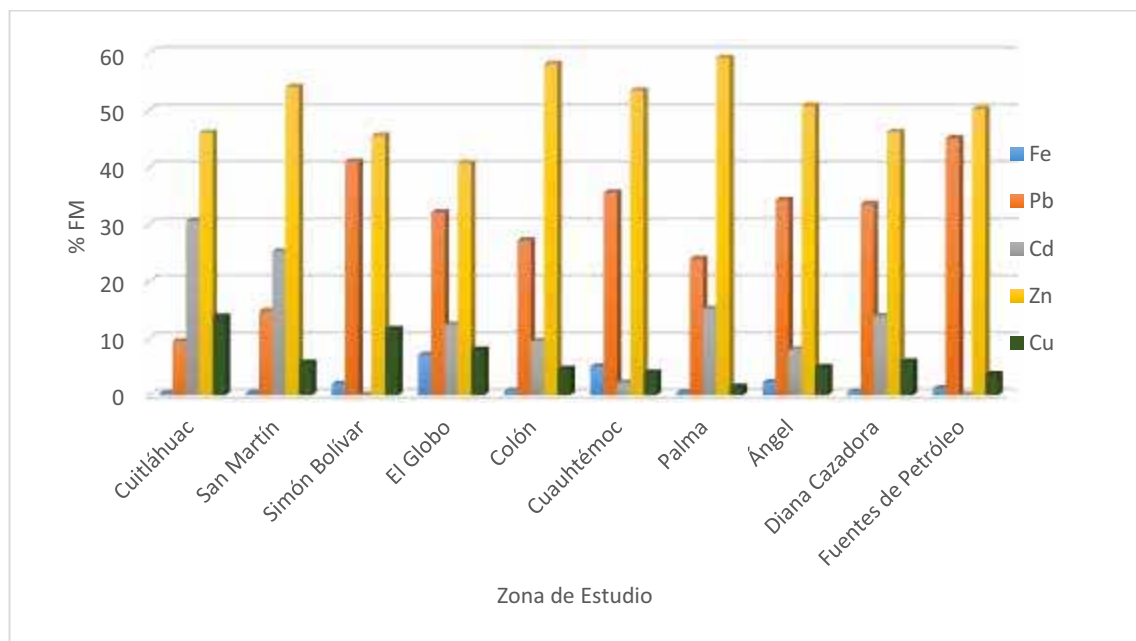
F3 = Resultados de la fracción oxidable, mg/kg

F4 = Resultados de la fracción residual, mg/kg

Los valores del factor de movilidad se interpretan como síntomas de inestabilidad relativamente altos y una disponibilidad biológica de metales tóxicos en los polvos.

Tabla 5.18. Factor de Movilidad de Metales Tóxicos.

Factor de Movilidad mg/kg					
Glorieta	Hierro	Plomo	Cadmio	Zinc	Cobre
Cuitláhuac	0.2	6.4	20.8	31.3	9.3
San Martín	0.2	7.2	12.3	26.4	2.8
Simón Bolívar	0.5	11.6	ND	12.9	3.3
El Globo	3.1	14.5	5.5	18.4	3.6
Colón	0.3	11.	3.8	23.6	1.8
Cauhtémoc	1.9	13.4	0.8	20.2	1.5
Palma	0.2	11.8	7.4	29.2	0.7
Ángel	0.9	15.2	3.5	22.6	2.1
Diana Cazadora	0.2	13.4	5.5	18.4	2.3
Fuentes de Petróleo	0.4	17.8	ND	19.8	1.4
Total	7.9	122.3	59.6	222.8	28.8



Gráfica 5.3 Factor de Movilidad de Metales Tóxicos.

Como se observa en la gráfica 5.3 y en la tabla 5.18, los resultados del presente estudio sugieren que la movilidad y la biodisponibilidad de estos cinco metales se presente en el siguiente orden de peligrosidad para el ser humano: $Zn > Pb > Cd > Cu > Fe$. Ya que algunas formas de metal son relativamente menos móviles.

Los índices de movilidad son considerablemente más altos para el zinc dado que osciló de un 40 a 59%. El Factor de Movilidad del cadmio osciló entre 7 a 30%; para el cobre osciló entre 1 a 13%, para el plomo osciló entre el 9 a 45% y por último el factor de movilidad para el hierro dio valores no superiores al 7%.

5.5.- Estadística del Método BCR.

Los datos de los resultados de la extracción secuencial de metales por el método BCR, fueron tratados estadísticamente, lo que incluye el cálculo de los parámetros fundamentales como la media aritmética, la desviación típica y los valores máximos y mínimos de cada variable. Este tipo de estadística fue realizada con el objetivo de establecer el grado de asociación entre variables analizadas. Para este estudio se consideró el número total de las muestras analizadas y los cinco metales tóxicos.

5.5.1.- Correlación Entre Metales de las Fracciones de la Extracción Secuencial BCR.

Se realizó el análisis de correlación de Spearman, para establecer si existe asociación entre los metales tóxicos de cada fracción. A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de esta correlación.

En la tabla 5.19, muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas.

Tabla 5.19. Estadística Descriptiva de los Metal por Cada Fracción del Método BCR

Variable	Observaciones	Mínimo (mg/kg)	Máximo (mg/kg)	Media (mg/kg)	Desv. típica
Fe- Fracción 1	10	57.100	1241.915	353.842	443.755
Fe - Fracción 2	10	0.000	3192.794	1402.972	843.755
Fe- Fracción 3	10	58.912	1577.289	696.747	646.491
Fe- Fracción 4	10	25420.291	57286.225	37389.861	9829.201
Pb- Fracción 1	10	6.047	20.429	15.574	5.238
Pb- Fracción 2	10	21.501	29.955	26.754	2.682
Pb- Fracción 3	10	34.361	63.017	41.235	8.463
Pb- Fracción 4	10	21.413	69.187	41.344	14.903
Cd- Fracción 1	10	0.000	1.215	0.322	0.365
Cd- Fracción 2	10	0.804	2.344	1.286	0.493
Cd- Fracción 3	10	2.159	3.787	3.122	0.545
Cd- Fracción 4	10	0.000	1.571	0.398	0.655
Cu- Fracción 1	10	1.035	6.144	3.547	1.925
Cu- Fracción 2	10	0.000	36.099	10.455	14.148
Cu- Fracción 3	10	41.716	157.135	97.969	41.221
Cu- Fracción 4	10	14.592	50.929	27.078	10.485
Zn- Fracción 1	10	5.718	52.629	17.434	14.018
Zn- Fracción 2	10	11.583	63.599	25.622	15.053
Zn- Fracción 3	10	4.436	73.373	22.631	18.824
Zn- Fracción 4	10	5.506	12.270	8.088	2.182

En la tabla 5.20 muestra el resultado del análisis de correlación de Spearman, para establecer si existe asociación entre las concentraciones de los metales de cada fracción BCR (tablas.4.10 a 4.14).

Tabla 5.20 Matriz de Correlación de Spearman de los Metales por Cada Fracción del Método BCR.

Variables	Fe1	Fe2	Fe3	Fe4	Pb1	Pb2	Pb3	Pb4	Cd1	Cd2	Cd3	Cd4	Cu1	Cu2	Cu3	Cu4	Zn1	Zn2	Zn3	Zn4
Fe1	1																			
Fe2	0.006	1																		
Fe3	-0.552	0.321	1																	
Fe4	0.406	-0.491	-0.430	1																
Pb1	0.539	0.018	0.127	0.442	1															
Pb2	0.503	-0.006	0.127	0.297	0.794	1														
Pb3	-0.394	0.236	0.842	-0.394	-0.042	0.115	1													
Pb4	0.430	-0.261	-0.127	0.552	0.418	0.103	0.079	1												
Cd1	-0.644	0.371	0.286	-0.322	-0.511	-0.535	0.395	-0.128	1											
Cd2	-0.418	0.321	0.055	-0.709	-0.612	-0.624	0.176	-0.200	0.681	1										
Cd3	-0.067	-0.091	0.358	0.273	0.600	0.491	0.333	0.491	0.103	-0.152	1									
Cd4	0.216	-0.515	-0.127	0.172	-0.127	0.306	0.142	0.052	-0.501	-0.365	-0.157	1								
Cu1	-0.212	-0.091	-0.552	-0.248	-0.685	-0.685	-0.418	-0.261	0.450	0.661	-0.406	-0.276	1							
Cu2	0.301	-0.301	-0.828	0.325	-0.399	-0.104	-0.595	-0.215	-0.129	-0.092	-0.522	0.385	0.522	1						
Cu3	0.309	-0.552	-0.333	0.576	0.333	0.176	-0.103	0.612	0.012	-0.115	0.418	-0.007	0.127	0.141	1					
Cu4	-0.067	-0.358	0.067	0.479	0.333	-0.176	-0.042	0.564	0.122	-0.139	0.345	-0.425	-0.055	-0.350	0.648	1				
Zn1	-0.419	0.116	0.450	-0.085	-0.219	-0.207	0.626	0.006	0.689	0.188	0.079	-0.217	0.073	-0.185	0.267	0.340	1			
Zn2	-0.261	-0.030	0.413	-0.036	-0.097	-0.049	0.626	0.055	0.494	0.091	0.067	-0.052	-0.024	-0.160	0.401	0.365	0.951	1		
Zn3	0.091	-0.067	-0.012	0.255	0.049	-0.267	0.201	0.553	0.409	0.176	0.091	-0.322	0.146	-0.123	0.681	0.729	0.659	0.695	1	
Zn4	0.176	-0.383	0.049	0.608	0.243	-0.024	0.055	0.505	-0.256	-0.614	-0.043	0.142	-0.377	-0.086	0.328	0.632	0.305	0.366	0.500	1

En la tabla 5.20 muestra la matriz de correlación de Spearman, los valores en negro demuestran buena correlación diferente de cero con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$, del cual se encontró que existió una buena correlación, entre las concentraciones del Fe- fracción 3 con Pb- fracción 3 (0.84) y una correlación negativa con Cu – fracción 2 (-0.83), otra correlación se da entre Zn- fracción 1 con Zn- fracción 2 (0.95) y con Cd fracción 1 (0.69), la concentración de Pb- fracción 1 tiene una correlación con Pb- fracción 2 (0.79) y una correlación negativa con Cu- fracción 1 (-0.68), la concentración de Fe- fracción 4 tiene una correlación negativa con Cd – fracción 2 (-0.71), otra correlación es la de Zn- fracción 3 con Zn – fracción 1 (0.66), Zn- fracción 2 (0.7), Cu – fracción 4 (0.73) y con Cu – fracción 3 (0.68).

Las correlaciones positivas indican que las concentraciones de metales en polvos provienen de productos de especies en fase gaseosa o sólida (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies metálicas, etc.) también estos metales pueden provenir de la erosión de suelos, como los de origen antropogénicos. Mientras que las correlaciones altas pero negativas pueden evidenciar alguna reacción química o movilidad preferencial de ciertos metales en favor de otros.

5.5.2.- Análisis de Componentes Principales Entre Metales de las Fracciones de la Extracción Secuencial BCR.

Se analizaron estadísticamente los datos, a partir de un análisis no paramétrico de varianza de los 5 metales y cada metal es una variable, con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ y un valor de p-valor (bilateral) de 1.000. Siendo el intervalo de confianza al 99%, se asume que las muestras provienen de la misma población a pesar de las diferencias que existe en cada avenida y para todos los metales.

Se presenta el análisis de componentes principales que es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante un banco de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número, perdiendo la menor cantidad de información posible. Con el objetivo de estimar las posibles fuentes de origen que afectan la concentraciones de los metales tóxicos en los sitios de muestreo

Los nuevos componentes principales o factores serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí.

Un análisis de componentes principales tiene sentido si existen altas correlaciones entre las variables, ya que esto es indicativo de que existe información redundante y, por tanto, pocos factores explicarán gran parte de la variabilidad total.

La elección de los factores se realiza de tal forma que el primero recoja la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor debe recoger la

máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se elegirán aquéllos que recojan el porcentaje de variabilidad que se considere suficiente. A éstos se les denominará componentes principales.

Para este análisis se utilizó el análisis de componentes principales (ACP), que es una técnica utilizada para encontrar aquellas variables que no están correlacionadas entre sí (Componentes o Factores), e indica la varianza de las variables analizadas.

En la tabla 5.21 se muestran los valores propios de cada componente principal, y justo debajo la proporción de varianza explicada por cada una de ellos y la varianza explicada acumulada, de las concentraciones de metales de las fracciones BCR (4.10 a 4.14) y los puntos de muestreo.

Tabla 5.21. Componentes Principales o Factores de los Metal por Cada Fracción del Método BCR.

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Valor propio	5.402	4.829	3.645	1.981	1.299	1.237	0.907	0.585	0.114
Variabilidad (%)	27.009	24.147	18.224	9.907	6.497	6.186	4.534	2.924	0.572
% acumulado	27.009	51.155	69.380	79.287	85.784	91.970	96.504	99.428	100.000

Los datos de varianza explicada son muy importantes para saber cuántos componentes principales vamos a utilizar en nuestro análisis. No hay una regla definida sobre el número que se debe utilizar, con lo cual se debe decidir en función del número de variables iniciales (hay que recordar que se trata de reducirlas en la medida de lo posible) y de la proporción de varianza explicada acumulada.

En este caso, parece razonable quedarse con los 4 primeros componentes principales, ya que aportan casi todo la variabilidad, ya que con ellos se explica el 79.2% de la varianza total. Además si se agrega el siguiente componente (F5) sólo se conseguirá un 6% extra de variabilidad, mientras que si se elimina el último factor seleccionado (F4) se perderá un 10% de variabilidad.

En la figura 5.3 se presenta el plano canónico que permiten visualizar las relaciones de correlación entre todas las variables originales, para los metales tóxicos de acuerdo a su posición, con respecto a la varianza del 51.16% distribuida en los ejes F1 y F2. Mientras que dentro de las áreas de cada uno de los cuatro pares de ejes factoriales, se ubican los metales que por su correlación más cercana presentan mayor probabilidad de compartir la misma fuente de origen.

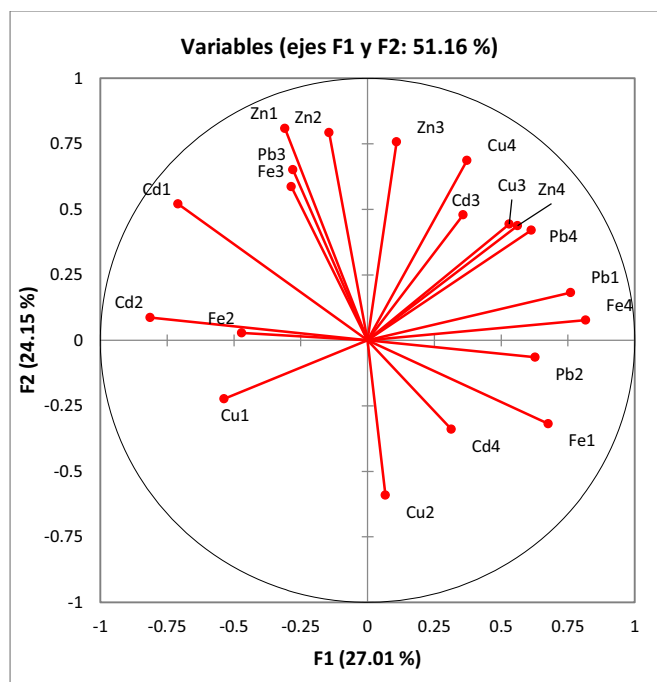


Figura 5.3. Plano Canónico Entre Metales Tóxicos y las fracciones del Método BCR, con una Distribución de la Varianza (51.16%) de los factores F1 y F2.

Se observa la formación de tres grupos muy emparentados:

Grupo 1: Zn- fracción 1, Zn- fracción 2, Fe- fracción 3, Pb- fracción 3.

Grupo 2: Cu- fracción 3, Cd- fracción 3, Zn- fracción 4, Cu- fracción 4, Pb- fracción 4

Grupo 3: Fe- fracción 1, Pb- fracción 2, Cd- fracción 4.

Mientras que el Cu- fracción 1 quedó aislado del resto de los componentes. Siendo la correlación más alta la que se da entre el Zn- fracción 4, Pb- fracción 4 y Cu- fracción 3, otra correlación alta es entre Pb- fracción 3 y Fe- fracción 3, al igual que la correlación entre Zn- fracción 1 y Zn- fracción 2. Todo esto indica que las concentraciones de metales de mayor correlación positiva en los polvos tienen la misma fuente de origen, mientras que las correlaciones altas pero negativas pueden evidenciar alguna reacción química o movilidad preferencial de ciertos metales en favor de otros.

En la figura 5.4 se presenta el plano canónico que muestran las asociaciones de las correlaciones, entre todas las variables originales (factor de cada metal), de acuerdo a su posición con respecto a la varianza del 28.13%, distribuida en los ejes F3 y F4. Mientras que dentro de las áreas de cada uno de los cuatro pares de ejes factoriales, se ubican los metales que por su correlación más cercana presentan mayor probabilidad de compartir la misma fuente de origen.

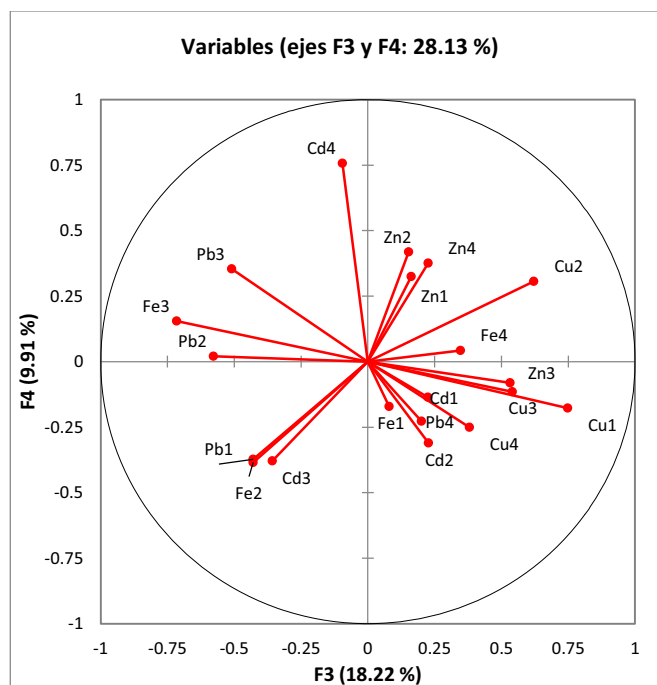


Figura 5.4. Plano Canónico Entre Metales Tóxicos y las Fracciones del Método BCR, con una distribución de varianza (28.13 %) de los factores F3 y F4.

La distribución de la varianza (28.13%) aportada por los componentes principales F3 y F4, generan la formación de cuatro grupos, en cada sistema de ejes factoriales.

Grupo 1: Pb- fracción 2, Fe- fracción 3, Pb- fracción 3

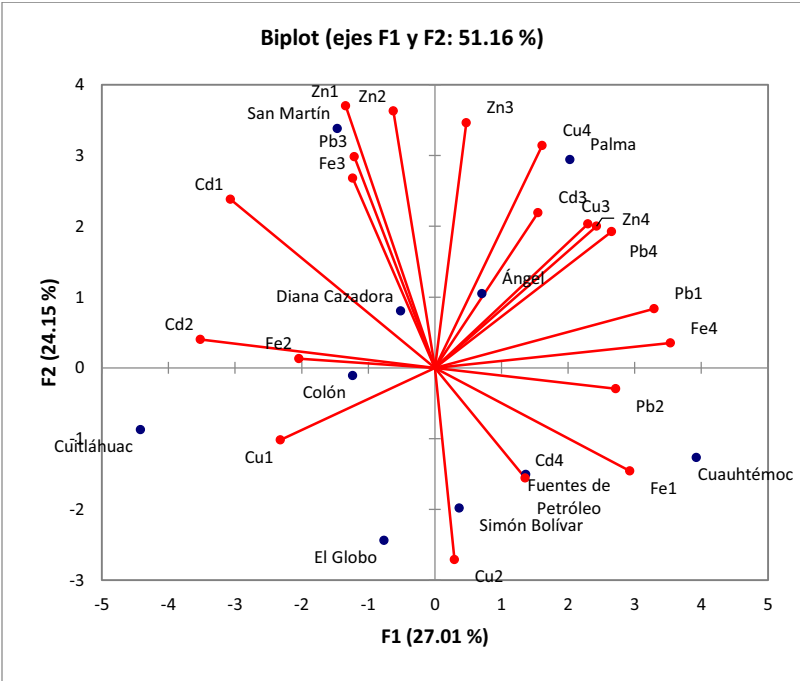
Grupo 2: Zn- fracción 1, Zn- fracción 2, Zn- fracción 4

Grupo 3: Fe- fracción 1, Cd- fracción 1, Cd- fracción 2, Cu- fracción 2, Cu- fracción 3, Zn- fracción 3, Pb- fracción 4, Cu- fracción 4.

Grupo 4: Pb- fracción 1, Fe- fracción 2, Cd- fracción 3.

En donde las correlaciones más asociadas son las que existen entre el Pb- fracción 1 y Fe- fracción 2, entre el Cu- fracción 3 y Zn- fracción 3, y entre el Zn- fracción 2 con Zn- fracción 1 y con Zn- fracción 4. Esto indica que las concentraciones de metales en polvos tienen la misma fuente de origen y sea producto especies en fase gaseosa o sólida (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies metálicas, etc.) también estos metales pueden provenir de la erosión de suelos, como los de origen antropogénicos. Realizando una comparación con la correlación de Spearman, se confirma que los metales con alta correlación provienen de la misma fuente antropogénica.

En la gráfica 5.4 se muestra el análisis de la posición de las fracciones de metales del método de extracción secuencial (BCR) y su asociación con los puntos de



Gráfica 5.4. Biplot de Correlación de Metales Tóxicos, Sitios de Estudio y Fracciones de la Extracción BCR.

Los tres grupos formados, por el tipo de metal (Fe, Cu, Zn, Cd o Pb) y su fracción del proceso de extracción secuencial (F1, F2, F3 o F4) correspondiente, se asocian de manera particular con los puntos de muestreo con las que tienen mayor afinidad de correlación.

Grupo 1: Zn- fracción 1, Zn- fracción 2, Fe- fracción 3, Pb- fracción 3. con San Martín.

Grupo 2: Cu- fracción 3, Cd- fracción 3, Zn- fracción 4, Cu- fracción 4, Pb- fracción 4. con La Palma.

Grupo 3: Fe- fracción 1, Cd- fracción 4. con Cuauhtémoc, Fuente de Petróleo, Simón Bolívar y con El Globo.

En donde las correlaciones más asociadas son las que existen entre:

Zn- fracción 1, Fe- fracción 3 y Pb- fracción 3 con la Glorieta de San Martín.

Cd- fracción 4 con la Glorieta de Fuente de Petróleo.

Cu- fracción 4 con la Glorieta de la Palma.

La Glorieta de La Fuente de Petróleos se caracteriza por contener concentraciones muy bajas de cadmio y por defecto no fueron detectadas por el equipo.

Otra correlación es entre Zn- fracción 1 con la glorieta de san Martín, ya que se caracteriza este sitio por contener las concentraciones más elevadas de este metal.

5.5.3.- Correlación de Spearman Entre Fracciones BCR y los Sitios de Muestreo.

Se realizó el análisis de correlación de Spearman, para establecer si existe asociación entre las zonas de estudio y las cuatro fracciones del método BCR. A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de esta correlación.

En la tabla 5.22 muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas.

Tabla 5.22. Estadística Descriptiva por Zona de Estudio por Cada Fracción del Método BCR.

Variable	Observaciones	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típica
Cuitláhuac Fracción 1	5	1.220	57.100	17.228	22.907
Cuitláhuac Fracción 2	5	1.740	1787.630	366.754	794.359
Cuitláhuac Fracción 3	5	2.880	1158.180	251.088	507.376
Cuitláhuac Fracción 4	5	0.000	25420.290	5092.360	11363.661
San Martín Fracción 1	5	0.590	72.870	27.868	32.732
San Martín Fracción 2	5	1.430	589.650	138.766	253.095
San Martín Fracción 3	5	2.790	145.800	76.340	59.104
San Martín Fracción 4	5	0.000	38103.850	7639.494	17030.104
Simón Bolívar Fracción 1	5	0.000	207.010	46.246	90.013
Simón Bolívar Fracción 2	5	0.970	1019.480	215.622	449.450
Simón Bolívar Fracción 3	5	2.160	77.340	40.502	32.957
Simón Bolívar Fracción 4	5	1.020	35157.060	7047.856	15713.532
El Globo Fracción 1	5	0.250	1241.920	254.754	551.874
El Globo Fracción 2	5	1.660	3192.790	653.836	1419.364
El Globo Fracción 3	5	2.600	92.480	41.854	35.031
El Globo Fracción 4	5	0.000	34464.880	6905.122	15406.379
Colón Fracción 1	5	0.210	84.580	23.040	35.105
Colón Fracción 2	5	0.200	1554.080	321.970	688.900
Colón Fracción 3	5	2.810	1577.290	340.034	692.043
Colón Fracción 4	5	1.390	26279.460	5266.296	11746.720
Cuauhtémoc Fracción 1	5	0.050	1111.900	229.310	493.439
Cuauhtémoc Fracción 2	5	0.000	36.100	18.062	16.680
Cuauhtémoc Fracción 3	5	3.560	157.130	58.544	61.571
Cuauhtémoc Fracción 4	5	1.570	57286.230	11474.652	25609.458
Palma Fracción 1	5	0.380	125.690	34.912	52.136

Palma Fracción 2	5	0.000	1694.040	350.400	751.248
Palma Fracción 3	5	3.700	1411.720	318.814	612.106
Palma Fracción 4	5	0.000	49901.640	10003.804	22303.584
Ángel Fracción 1	5	0.160	353.980	79.268	153.831
Ángel Fracción 2	5	0.000	1689.350	350.774	748.453
Ángel Fracción 3	5	3.410	1315.030	299.592	569.338
Ángel Fracción 4	5	0.000	32849.370	6585.398	14682.016
Diana Cazadora Fracción 1	5	0.360	87.840	24.198	36.262
Diana Cazadora Fracción 2	5	0.000	1103.990	229.780	488.812
Diana Cazadora Fracción 3	5	3.790	1003.240	240.388	429.430
Diana Cazadora Fracción 4	5	0.000	34418.670	6902.556	15381.992
Fuentes del Petróleo Fracción 1	5	0.000	195.520	44.620	84.743
Fuentes del Petróleo Fracción 2	5	0.480	1398.700	288.212	620.894
Fuentes del Petróleo Fracción 3	5	3.530	166.790	56.256	67.851
Fuentes del Petróleo Fracción 4	5	0.000	40017.160	8016.004	17889.194

La matriz muestra los coeficientes de correlación existente entre todos los pares de variables tratadas. Cuando más próximo es el valor del coeficiente de correlación entre las dos variables a uno en valor absoluto, más se aproxima a una relación lineal. Un valor cercano a cero implica que las dos variables no están significativamente asociadas.

Tabla 5.23. Matriz de correlación de Spearman, entre fracciones de cada punto de muestreo.

En la tabla 5.23 se muestran los resultados de la matriz de correlación de Spearman, los valores en negro demuestran buena correlación diferente de cero con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. En este análisis de correlación se puede observar que existe asociaciones totales del 100 % entre diversos pares y grupos de fracciones de los diferentes puntos de muestreo, por ejemplo entre las concentraciones de:

- Fracción 1-Cuitláhuac- con fracción 1-San Martín (1.0)
- Fracción 2-San Martín y la fracción 1-Palma (1.0)
- Fracción 1-San Martín con fracción 1- Palma (1.0)
- Fracción 1-San Martín con fracción 2-San Martín (1.0)
- Fracción 2-Globo con fracción 3-Cuitláhuac, fracción 4-San Martín y Fuente de Petróleo- fracción 3 (1.0)
- La correlación de fracción 4-Colón con fracción 4-Cuitláhuac (1.0)
- Fracción 4-Simón Bolívar, fracción 3-Colón y fracción 4-Fuente de Petróleos (1.0)
- Fracción 2-Ángel con fracción 4-Palma (1.0).

Estas son algunas de las principales correlaciones que se obtuvieron, indican que las concentraciones de metales en polvos tal vez sea producto especies en fase gaseosa o sólida (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies metálicas, etc.) también estos metales pueden provenir de la erosión de suelos, como los de origen antropogénicos.

5.5.4.-Análisis de Componentes Principales Para Metales Tóxicos Y los Sitios de Estudio.

Analizando estadísticamente los datos, a partir de un análisis no paramétrico de varianza de los 5 metales y cada metal es una variable, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y un valor de p-valor (bilateral) de 1.0. Con un intervalo de confianza de 99%, se asume que las muestras provienen de la misma población a pesar de las diferencias que existe en cada avenida.

En la tabla 5.24 se muestran los valores propios de cada componente principal, la proporción de varianza explicada por cada una de ellos y la varianza explicada acumulada, para cada factor.

Tabla 5.24. Componentes Principales o Factores por Zona de Estudio y por Cada Fracción del Método BCR

	F1	F2	F3	F4
Valor propio	30.522	7.080	1.571	0.826
Variabilidad (%)	76.306	17.701	3.928	2.065
% acumulado	76.306	94.007	97.935	100.000

En la tabla 5.24 muestra que los factores F1 y F2 aportan casi toda la varianza (94%). En este caso, parece razonable quedarse con esos dos componentes principales, ya que con ellos se explica casi toda la varianza del estudio.

La figura 5.5 se presenta en un plano canónico, que permite visualizar las relaciones de las correlación entre las variables originales, para los metales tóxicos y de estos con los ejes factoriales. Donde estos ejes representan principalmente que los metales tiene la misma fuente de origen.

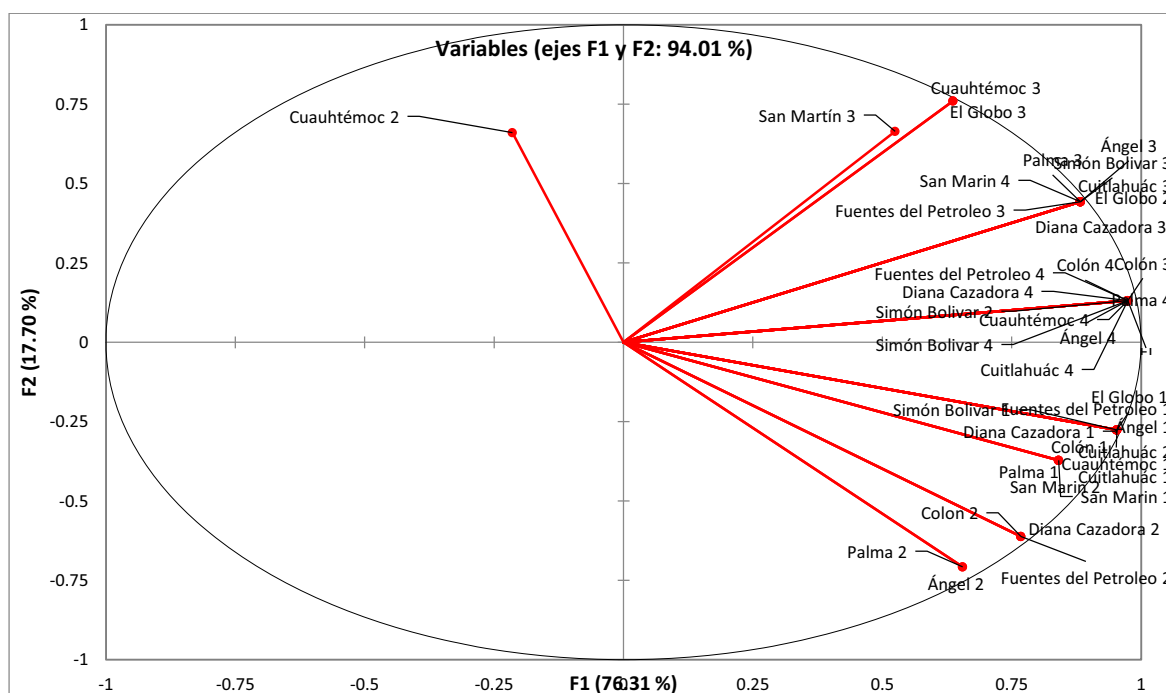


Figura 5.5. Plano Canónico Entre Fracciones del Método BCR y Sitios de Muestreo, con una Distribución de Varianza (94.01 %) de los Factores F1 y F2.

En el plano canónico de los componentes principales F1 Y F2 con el aporte del 94.01 % de la varianza tota, se observa que hay correlaciones entre concentraciones de metales de las fracciones obtenidas por el método BCR (F1, F2, F3 Y F4) por punto de muestreo, es decir tienen la misma fuente de origen. Esto indica que las concentraciones de metales en polvos tal vez sea producto especies en fase gaseosa o sólida (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies metálicas, etc.) también

estos metales pueden provenir de la erosión de suelos, como los de origen antropogénicos.

Algunas de las correlaciones que se obtuvieron fueron:

Grupo 1: Fracción 3-San Martín, fracción 3-Cuautémoc, fracción 3-El Globo, fracción 3-el Ángel, fracción 3-la Palma, fracción 3 Simón Bolívar, fracción 3-Cuitlahuác, fracción 2-El Globo, fracción 4 San Martín, fracción 3-Fuente de Petróleos, Fracción 3-Diana Cazadora, fracción 3-Colón, fracción 4-Colón, fracción 4-Fuente de Petróleos, fracción 4- la Palma, fracción 4-la Diana Cazadora, fracción 2-Simón Bolívar, fracción 4-Cuahutemoc, fracción 4-Simón Bolívar y fracción 4-el Ángel.

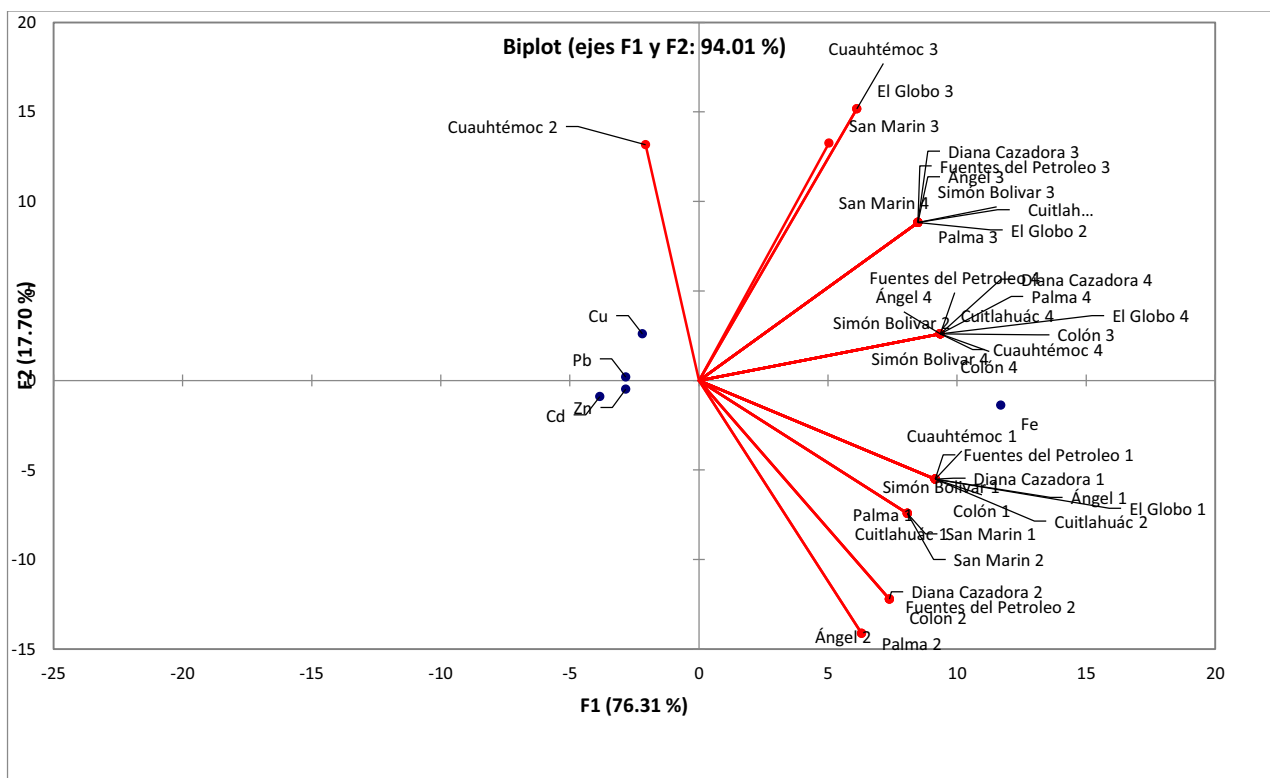
Grupo2: Fracción 1-El Globo, fracción 1-Fuente de Petróleos, fracción 1-Simón Bolívar, fracción 1-El Ángel, fracción 1-La Diana Cazadora, fracción 1-Colón, fracción 2-Cuitlahuác, fracción 1-Cuauhtémoc, fracción 1-La Palma, fracción 1-Cuitlahuác, fracción 2-San Martín, fracción 1-San Martín, fracción 2-Colón, fracción 2-La Diana Cazadora, fracción 2- La Palma, fracción 2-Fuente de Petróleos y fracción 2-El Ángel.

Queda aislada en un sistema de ejes factoriales, la fracción 2 de la Glorieta Cuauhtémoc (F2-Cuauhtémoc).

Algunas de las correlaciones con mayor asociación, fueron:

- Fracción 3-Cuahutémoc con fracción 3-el Globo.
- Fracción 3-Cuitlahuac con fracción 2-el Globo, fracción 3-la Palma, fracción 3-Fuente de Petróleos, fracción 4-San Martín, fracción 3-el Ángel y fracción 3-Simón Bolívar y fracción 3- Diana Cazadora.
- Fracción 4- la Palma F4-Colón, fracción 3-Colón fracción 4-Fuente de Petróleos, fracción 4-Diana Cazadora, fracción 2-Simón Bolívar, fracción 4-Cuahutemoc, fracción 4-Simón Bolívar, fracción 4-El Ángel y fracción 4-Cuitláhuac.
- Fracción 1-El Ángel con fracción 1-El Globo, fracción 1-Fuente de Petróleo, fracción 1-Simón Bolívar, y Fracción 1-Diana Cazadora.
- Fracción 1-Colón con fracción 2-Cuitlahuác, fracción 1-Cuauhtémoc, fracción 1-la Palma, fracción 1-Cuitlahuác, fracción 2-San Martín y fracción 1-San Martín.
- Fracción 2-Colón con fracción 2 Diana Cazadora y fracción 2- Fuente de Petróleos.
- Fracción 2-laPalma con fracción 2- el Ángel.

En la gráfica 5.5 se muestra el análisis de los metales tóxicos con respecto al primero y segundo componente principal.



Gráfica 5.5. Biplot de Correlación de Metales Tóxicos , Sitios de Estudio y Metales Totales por el Método BCR.

En la gráfica 5.5 se puede observar el análisis de las concentraciones de cada fracción de metales (F1, F2, F3 y F4) del método BCR de sus respectivos puntos de muestreo, ubicados en la gráfica biplot generada por las varianzas del primero y del segundo componentes principales (Factor 1 y Factor 2 con el aporte de 94.01% de la varianza total), estableciendo su asociación con las concentraciones totales de cada metal (Cu, Pb, Zn, Cd y Fe) de las fracciones BCR:

Al parecer las concentraciones totales de cuatro metales (Cd, Cu, Pb y Zn) se asocian muy cercanas al origen de los ejes factoriales, de todas las concentraciones de las fracciones de metales.

Por otra parte sólo la concentración total del Fe se encuentra asociada casi exactamente entre los dos grupos formados por todas las fracciones de las diferentes estaciones.

Grupo 1: Fracción 3-San Martín, fracción 3-Cuautémoc, fracción 3-el Globo, fracción 3-el Ángel, fracción 3-la Palma, fracción 3 Simón Bolívar, fracción 3-Cuitlahuac, fracción 2-el Globo, fracción 4 San Martín, fracción 3-Fuente de Petróleo, fracción 3-Diana Cazadora, fracción 3-Colón, fracción 4-Colón, fracción 4-Fuente de Petróleo, fracción 4- la Palma, fracción 4-Diana Cazadora, fracción 2-Simón Bolívar, fracción 4-Cuahutemoc, fracción 4-Simón Bolívar y fracción 4-el Ángel.

Grupo2: Fracción 1- el Globo, fracción 1-Fuente de Petróleo, fracción 1-Simón Bolívar, fracción 1-El Ángel, fracción 1- Diana Cazadora, fracción 1-Colón, fracción 2-Cuitlahuác, fracción 1-Cuauhtémoc, fracción 1-la Palma, fracción 1-Cuitlahuác, fracción 2-San Martín, fracción 1-San Martín, fracción 2-Colón, fracción 2- Diana Cazadora, fracción 2- la Palma, fracción 2-Fuente de Petróleos y fracción 2- e1l Ángel.

Queda aislada en un sistema de ejes factoriales, la fracción 2 de la glorieta Cuauhtémoc (F2-Cuauhtémoc).

Mientras que la Glorieta de Cuauhtémoc sigue aislada incluso de las concentraciones totales de los cinco metales, aunque comparte de igual manera su asociación en el origen.

6.-Conclusiones.

Las concentraciones de metales tóxicos determinados en polvos recolectados a lo largo de la avenida Paseo de la Reforma varían significativamente de un sitio a otro, y esto puede depender de algunos factores físicos, químicos y ambientales. Tales como la intensidad de tráfico, el origen y mantenimiento del material de recubrimiento de avenidas, la acción del régimen climático, los tipos de combustible y su combustión, el tipo y cantidad de flujo de autotransporte así como su estado físico.

Se puede observar que los valores de concentración total de cada uno de los metales analizados, difieren con lo reportado por varios autores, debido a diferencias importantes de cada lugar de muestreo como es el aforo vehicular, los sitios de muestreo etc. Los resultados obtenidos revelan que los polvos presentaron una concentración decreciente $Fe > Pb > Cu > Zn > Cd$ en todos los puntos de muestreo. Y el hierro se encuentra en una concentración demasiado elevada en comparación con los demás metales, ya que es uno de los elementos más abundantes en la naturaleza.

Los puntos de muestreo con mayor presencia de metales tóxicos son la glorieta de San Martín y Cuauhtémoc y la de menor concentración es la glorieta del Ángel. Además las glorietas con mayor flujo vehicular son Cuitláhuac, la Palma y Simón Bolívar y las de menor flujo Colón y el Globo.

Se realizó un análisis de correlación de Spearman y ACP para establecer si existe asociación entre metales totales, flujo vehicular y sitios de muestreo. Una de las correlaciones realizadas fue entre metales totales y se encontró que existe una correlación entre el hierro-cobre y zinc-plomo, estas correlaciones fueron relativamente altas, a mayor concentración de hierro mayor concentración de cobre y mayor concentración de zinc mayor concentración de plomo. Esto indica que las concentraciones de estos metales provienen de la misma fuente de origen (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies químicas, etc.), el análisis de componentes principales confirmó las correlaciones existentes de estos metales.

También se realizó el análisis de correlación de Spearman, para establecer si existe una correlación entre metales totales y flujo vehicular, en el cual se encontró que existe una correlación entre el zinc y flujo vehicular total, a mayor flujo vehicular mayor concentración de zinc. Aunque este metal no presentó concentraciones elevadas, es el que muestra asociación al flujo vehicular, por lo que es posible inferir que estas concentraciones son producto de desgaste de especies metálicas, aceites de motor, anticongelantes, etc. De igual manera el análisis de componentes principales confirmó las correlaciones existentes entre el flujo vehicular total y el zinc.

En cuanto al factor de enriquecimiento (FE) indicó al plomo y al cadmio como contaminantes moderadamente enriquecidos debido a una fuente adicional a la de la roca madre y muestra que existe una grave contaminación de origen

antropogénico. El origen del zinc no se ve afectado por otro tipo de fuente que no sea la de la roca madre.

Los índices de geoacumulación (I_{geo}) indican una contaminación extremada para plomo y cadmio, y nula o moderada para el zinc. Para el factor de contaminación y grado de contaminación demuestra que existe una elevada contaminación de plomo y cadmio y para el zinc se encontró un bajo grado de contaminación.

El factor potencial de riesgo ecológico demostró una elevada contaminación de cadmio y baja para plomo y zinc. En general los cálculos de índices de contaminación demuestran que existe una elevada contaminación o enriquecimiento de cadmio y plomo, lo cual indica que hay un grado de contaminación muy elevado de tipo antropogénico en el sitio de estudio.

De acuerdo a la distribución granulométrica la fracción de tamaño de 1190 μm tiene el mayor porcentaje de contribución del materia total de la partícula, mientras que la fracción de tamaño 200 μm fue el menor porcentaje de contribución, este tamaño es lo suficientemente pequeño para ser inhalado por el aparato respiratorio del ser humano o incluso ingerido accidentalmente.

Mediante los resultados de los metales por distribución granulométrica para el caso de plomo, las concentraciones más altas las presentan las partículas de mayor tamaño, cuyo origen se asocia al desgaste de las pastillas de freno, la pérdida de peso en los neumáticos, pero con la eliminación gradual de la gasolina con plomo, podría decirse que la principales emisiones de Pb se da por el desgaste de piezas de automóviles.

De igual manera para el cadmio las concentraciones más altas las presentan la partículas de mayor tamaño, el cadmio proviene de las piezas metálicas de los automóviles, lubricantes para automóviles o bien el desgaste de las llantas las cuales contienen este metal.

La distribución del zinc es homogénea, presentando valores muy cercanos en todos los tamaños de partícula, se ha demostrado que el Zn proviene de fugas de aceite, como los aceites lubricantes y es un componente de las pastillas de freno, mientras que el hierro sus concentraciones más altas se presentan en las partículas de mayor tamaño, cuyo origen puede asociarse a la degradación de piezas metálicas.

Para el cobre no existe una tendencia definida en los tamaños de partícula, presentando concentraciones elevadas en todos los tamaños. Es importante señalar que la avenida Paseo de la Reforma es una zona de la ciudad que tiene una alta densidad de edificaciones destinadas a viviendas, oficinas y negocios, por lo que se puede pensar en una posible exposición de las personas a la contaminación con metales tóxicos.

El método BCR da una buena aproximación de la cantidad de la concentración que podría ser liberada de metales tóxicos en el aparato digestivo, cada fracción indica la simulación en la que se encuentra en el sistema gastrointestinal.

Al realizar el método BCR, cada metal mostró un perfil de especiación en particular. Las concentraciones de Pb y Fe, en las fracciones obtenidas mostraron que los valores más altos corresponden a las formas química más estable y menos peligrosa, como es la fracción residual (F4) simulación del recto, lo cual implica el menor riesgo a la salud, a lo contrario para los metales de Cd y Cu al cual se encontraron valores más altos en la fracción oxidable (F3) simulación del Intestino grueso lo cual implica biodisponibilidad y un riesgo a la salud. Mientras que el Zn se encuentra más homogenizado en las cuatro fracciones.

A partir de las concentraciones obtenidas de cada fracción se determinó el factor de movilidad, ya que algunas formas son relativamente menos móviles; el potencial de movilidad de hierro es muy bajo no superior al 7 %, sin embargo para el zinc se tienen valores relativamente altos hasta el 59% de movilidad. Este factor se puede interpretar como síntomas de inestabilidad relativamente alto para metales, en términos generales los metales siguen un orden de peligrosidad para el ser humano de : $Zn > Pb > Cd > Cu > Fe$.

En la correlación de Spearman para el método BCR, fue realizado con el objetivo de establecer el grado de asociación entre metales tóxicos de cada fracción del método BCR. Algunas de estas correlaciones fueron Fe- fracción 3, Cd- fracción 1 Pb- fracción 2 entre otras. Esto indica que las concentraciones de estos metales provienen de la misma fuente de origen (aerosoles, mala combustión, desgaste de especies químicas, etc.), también estos metales pueden provenir de la erosión del suelo. El análisis de componentes principales confirmó las correlaciones existentes de estos metales.

La correlación de Spearman entre fracciones del método BCR y los sitios de muestreo, demostró que existe asociaciones totales del 100% entre diversos pares y grupos de fracciones de las diferentes puntos de muestreo, por ejemplo fracción 1- Cuitláhuac con fracción- San Martín, Fracción 2-San Martín con fracción 1-Palma, Fracción 1-San Martín con fracción 1- la Palma. Estas son algunas de las principales correlaciones que se obtuvieron, indican que las concentraciones de metales en polvos tal vez sea producto de la misma fuente de origen.

Mientras que el cadmio siempre mostró una correlación relativamente baja y negativa con los otros metales, es decir a menor concentración de cadmio mayor concentración de cualquiera de los otros metales, lo que puede ser un indicador importante del origen antropogénico.

7.- Referencias.

- Ahmed, F., & Ishida, H. Trace metal concentration in street dusts of Dhaka City, Bangladesh, *Atmospheric Environment*, (40), 3835-3844, 2006.
- Albert. *Toxicología Ambiental*, Ciudad Juárez, Chihuahua, Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, 2004.
- Aldape F, Flores J., García R & Nelson J.W. Pixe analysis of atmospheric aerosols from a simultaneous three sites sampling during the autumn of 1993 in Mexico City; *Nucl. Instr. Meth, B.*, 109/110, 502-505, 1996.
- Alloway, B.J. *Heavy metals in soils*. John Wiley & Sons, Inc NJ. 7–18, 1990.
- ATSDR. Departamento de salud y servicios humanos de los EE.UU, Servicio de salud Pública Agencia para sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades, 2012.
- ATSDR. Toxicological profile for lead US Dept. of health and Human Services, Atlanta, EUA, 1993.
- ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for zinc, U.S. Department of Health and Human Service. Atlanta, 1993-1.
- Aufderheide, & Wittmers, L. Selected aspects of the spatial distribution of lead in bone, *Neuro. Toxicology* 13: 809-820, 1992.
- Badii, M.H., A. Guillen, O.P. Lugo Serrato & J.J. Aguilar Garnica. Non-Parametric Correlation and Its Application in Scientific Research, *International Journal of Good Conscience*, 9 (2), 31-40, 2014.
- Barco Evaluación de la movilidad de metales tóxicos en polvos recolectados en avenidas de alto aforo vehicular en el eje 5 de la Ciudad de México, tesis de Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales, Unidad Azcapotzalco, UAM, 2012.

- Baró, J. & Alemany, R. Estadística II. Ed. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya. Barcelona, 2000.
- Banerje, A.D.K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi India. *Environmental Pollution*, 123: 95-105, 2003.
- Beckwith P.B. Ellis J.B. Revitt D.M & Oldfield F. Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments. *Phys, Earth planet. Inter*, 42, 67-75, 1986.
- Bellot, I.J.L. Principios de urgencias, emergencias y cuidados críticos, capítulo 10.8 Disponible en tratado. "uninet.edu" consultado 23 de febrero del 2015.
- Bhatnagar, A. Cardiovascular pathophysiology of environmental pollutants, *Am J physiol Heart Circ physiol*, (286): 479-485, 2004.
- Bergues Garrido P.S. Evaluación de metales pesados en los suelos del coto minero mangasífero Cristo Barrancas, *Minería y Geología*. 43-57, 2011.
- Berkowitz, G., Moline, J., & Todd, A. Methodological issues related to studies of lead mobilization during menopause, *Salud Pública Mex.* (41), 88-92, 1999.
- Boyd, H.B., Pedersen, F., Cohr, H.H., Damborg, A., Jakobsen, B.M., Kristensen, P. & Samsoe-Petersem, L. Exposure scenarios and guidance values for urban soil pollutants. *Regu. Pharma*, 30: 197-208, 1999.
- Bremner I., & Beattie J. *Metallothionein and the trace minerals*, *Annu. Rev. Nutr.* (10), 63-83, 1990.
- Buchanan, S. D., Diseker, R. A. 3rd, Sinks T., Olson D. R, Daniel J. & Flodman T. Copper in drinking water, *Nebraska*, *Int J Occup Environ Health*, (5), 256-261, 1994.
- Buonicore, A., Wayne T. *Air Pollution Engineering Manual*. Ed. Van Nostrand R. New York. 5-13, 1992.

- Canada Council of Ministers of the Environment. Interim Canadian Environment Quality Criteria for Contaminated Sites. Report CCME EPCC534 Winnipeg, Manitoba, 1991.
- Calabrese, Ej., Barnes R., Stanek III, Ej., Pastides H., Gilbert C., Veneman P., Wang X., Lasztity, A., y Kostecki PT. How Much soil Do y Young Children Ingest, An Epidemiologic study. *Regul Toxicol Pharmacol*, (10), 123- 137, 1989.
- Calabrese, Ej., Stanek Ej., James Rc., & Robert Sm. Soil ingestion: A concern for acute toxicity in children, *J Environ Health*, (61), 18-23, 1999.
- Charlesworth, S., Everett M., McCarthy R., Ordóñez A.E., & de Miguel. A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry, West Midlands, UK, *Environment International*, (29), 563– 573, 2003.
- Christoforidis, A. & Stamatis N. *Geoderma*, (151), 257, 2009.
- Cornelis, R., Borguet, F., De Kimpe, J. Trace elements in medicine, *Analytical Chemical*. (283), 183-189, 1993.
- Cousins R.J Absorption, transport, and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionein and ceruloplasmin, *Physiological Reviews*. (65), 238-309. 1985.
- Davis & Waller, P. Quantitative Estimates of soil Ingestion in Normal Children Between the ages of 2 and 7 years: Population-Based estimates Using aluminum, silicon, and titanium as soil tracer elements. *Arch environ Health*, (45), 112-122, 1990.
- Durán C. Armando, Determinación de los niveles de contaminación con plomo en lo suelos y polvos de las calles de la ciudad e Mracay. *Agronomía Trop*, 56 (29), 2006.
- Ellis K. J, Vartsky D., Zanzi I., Cohn S, Yasumuru S, Cadmium: in vivo measurement in smokers and non – smokers. *Science*; (205), 323, 1979.
- Ellies, J & Revitt, M. Incidence of heavy metals in street surface sediments: solubility and grain size studies, *Water, Air and Soil Pollut*, (17), 87-100, 1982.

- Favier M & Hininger I. Oligoéléments: zinc, cuivre, sélénium, chrome. Conséquences d'une carence, d'un excès en oligoéléments et intérêt d'une supplementation systématique, *J. Gynecol. Obstet. Biol. Reprod.* (26), 109-114, 1997.
- Fenger, J. Urban air quality. *Atmos. Environ.*, 33: 4877-4900, 1999.
- Ferreira, B. L. & De Miguel, E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban, Environment. *Atmospheric Environment*, (39), 4501-4512, 2005.
- Fleming, C. Trace element metabolism in adult patients requiring, total parenteral nutrition, *Am. J. Clin. Nutr.* (49), 573-579, 1998.
- Flores J, Santos C, Álvarez M, Raymundo C, Hilario P, & Vaca M, Evaluación de Metales Tóxicos en una zona habitacional en el Norte de la Ciudad de México, 4 congreso internacional de docencia e investigación en química, Universidad Autónoma Metropolitana, 2013.
- Flores J; Vaca M; López R; M; Caracterización de metales tóxicos en polvos de la ciudad de México, *Revista Internacional de contaminación Ambiental*; (14) 2, 93 -100, 1998.
- Flores R.J. *Les métaux toxiques dans les eaux pluviales en milieu urbain: Caracteristiques Physico-chimiques*. Tesis Doctoral, Université Paris XII-Val de Marne, Francia, 1992.
- Flores J. Vaca M; López R; González A; Barceló M; Metales Tóxicos en Polvos de Estacionamiento Cerrados, 1998.
- Fuentes Valentina, Rojas luisa, Diaz Alfredo y Martínez Gregorio, Distribución de metales pesados en los sedimentos superficiales del Saco del Golfo de Cariaco, Sucre, Venezuela. *Biol, trop*, 58(3) 2010.
- Gasser, U., Walker, W., Dahlgren; R., Burch, R & Burau, R. Lead release from smelter and mine waste impacted materials under simulated gastric conditions and relation to speciation. *Environ. Sci. Tech.* 30: 764-769. 1996.
- Galán, E & Romero, B.A. Contaminación de Suelos por Metales Pesados, *Sociedad española de mineralogía*, (10), 48-60, 2008.

Gerhardsson Englyst V. & Lundström N. Lead in tissues of deceased lead smelter workers, J. Trace Elements Med. Biol. 9: 136-143, 1995.

Gibson, M.G & Farmer J.M, Environ. Pollut. B 11-117, 1986.

González M. *Elementos traza en biopatología y neuropsicología*, Ed Mapfre Madrid. 1996.

González Reimers, E. Martinez Riera, A & Santolaria Fernandez, F . Relative and combined effects of ethanol and protein deficiency on zinc, iron, copper, and manganese contents in different organs urinary and fecal excretion, alcohol. 16: 7- 12, 1998.

Gutiérrez, M. & Fortoul, T. Conceptos básicos de toxicología ambiental, En Albert (Ed). Toxicología Ambiental. Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, Ciudad de Juárez, México, 2004.

Gunay N, Yildirim C, Karcioğlu O, Gunay NE, Yilmaz M, Usalan C, Kose A & Togun I. A series of patients in the emergency department diagnosed with copper poisoning: recognition equals treatment, Tohoku J Exp Med, 209: 243-248, 2006.

Hakanson, L., An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach (J), Water Research, (14), 975 – 1001, 1979.

Harrison R. M., Laxen D. P. H. & Wilson S. L. *Chemical associations of lead, cadmium, copper and zinc in street dusts and roadside soils*, Environmental Science & Technology, (11)15, 1378 – 1383, 1981.

Hamilton R.S. Revitt D.M & Warren R.S, Levels and physic-chemical associations of Cd, Cu, Pb and Zn in road sediments. Sci. Total Environ, 33, 59-74, 1984.

Han, LI, Zhuang, GU, Cheng, S, Wang & Liu, j. Characteristics of resuspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing. Atmos. Environ. 41: 7485-7499, 2008.

Hernández Tavera, M, Evaluación de la concentración de metales tóxicos contenidos en polvo sedimentado en zonas industriales y habitacionales de la zona

metropolitana del valle de México, tesis de maestría en ciencias con especialidad en medio ambiente y desarrollo integrado, Instituto Politécnico Nacional, 2002.

Honda R., Tsuritani I. & Ishizaki M. Zinc and copper levels in ribs of cadmium-exposed persons with special reference to osteomalacia, *Environ. Res.* 75: 41-48, 1997.

Husar R. B, Husar J. D. Air pollution emissions, atmospheric processes and effects on visibility. Lecture notes for Air and Ecosystem Management Training Course. Center for Air Pollution Impact and Trend Analysis (CAPITA). 1996.

Johnson, R. R: Elementary statistics . Belmont, etc. : Duxbury, cop, 1996.

Kjellstrom T & Nordberg G. F. A kinetic model of Cd metabolism in the human being, *Environ Res*; 16: 248–69. 1978.

Koizumi N., Inoue & Ninomiya R. *Relationship of cadmium accumulation to zinc or copper concentration in horse liver and kidney*, *Environ Res.* 49: 104-114, 1989.

Kushner J. P., Porter J. P., Olivieri N. F., Secondary iron overload, *Hematology (Am Soc Hematol Educ Program)*. p. 47-61, 2001.

Lawson, D. R. y Winchester J. W. *A Estandar Crustal Aerosol as a Reference for Elemental Enrichment Factors*. *Atmospheric Environment*. 10:925-930, 1979.

Lauwerys R. L'impact sanitaire de la pollution par le cadmium en Belgique: Etat de la question. Mémoires de l'Académie Royale de Médecine de Belgique; (141) 453-9.1986.

Levy B. S, Wegman D. H, Eds. Occupational Health, Recognising and Preventing Work Related Diseases, 2nd Edition. Boston, USA: Little, Brown and Co, 1998.

Macready, N. Zinc supplements improve children's health, *BMJ*. 317: 369. 1998.

- Maskall, J. E., Thornton, I, Chemical partitioning of heavy metals in soils, clays and rocks at historical lead smelting sites. *Water Air Soil Pollut*, (108), 391-409, 1998.
- Mielke, H. & Reagan, P. Soil is an important pathway of human lead exposure, *Environmental Health Perspectives*. 106: 217-229, 1998.
- Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, Directorate General for Environment Protection (Netherlands). *Environmental Standards for soil and Water* Leidschendam. 1991.
- Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez, E., González-Hernández, G., Romero, F., Lozano, R. & Beramendi-Orosco, L.E. Assessment of heavy metal pollution in urban topsoils from the metropolitan area of Mexico City. *J. Geochem. (101)*, 218–224, 2009.
- Morrison, G, Metal speciation in urban runoff, tesis de doctorado, Middlesex University, Londres, 316 p. 1985.
- Mullis R., Bussy A. Quality control for heavy metal analysis of water, tissue and sediment Report 1, UPRC. Middlesex Polytechnic, UK. 28. 1992.
- Müller G., Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River, *Geojournal*, 1(2):108-118. 1969.
- Nasser, M.A., Inas, A.S, Heavy Metal Contamination in Roadside Dust Along Major Roads and Correlation With Urbanization Activities in Cairo, Egypt, *Journal of American Science*, 8(6), 379-389, 2012.
- Nathanson, J. Basic Environmental Technology. Water supply, waste management and pollution control. Ed. Prentice Hall, Chap. 13, 1997.
- Oleru U. G Kidney, liver, hair and lungs as indicators of Cd absorption, *Am Ind Hyg Assoc J*; 37: 617-30, 1976.
- Pérez –Cid B., Lavilla I. & Bendicho C. Application of microwave extraction for partitioning of heavy metals in sewage sludge. *Anal. Chim. Acta*. 378, 201–210, 1999.
- Pita Fernandez S. & Pértiga Díaz S. Relación Entre Variables Cuantitativas, Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo, A Coruña Cad Aten Primaria, 4: 141-144. 1997.

Poissant L., Schmitt J. P., Béron P, Trace Inorganic Elements in Rainfall in the Montreal Island, Pergamon Press, Inglaterra, 1994.

PROFEPA. Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Criterios internos de muestreo y análisis y restauración de suelos. 1999.

Qingjie Gong, Jun Deng, Yunchan Xiang, Qingfei Wang & Yng Liqiang, Calculating Pollution Indices By Heavy Metals in Ecological Geochemistry Assessment and a Case Study in Parks of Beijing. Journal of China University of Geosciences 19 (3) 2008.

Rakib, M. A, Ali M., Akter, M. S., Bhuiyan, A. H., Assessment Of Heavy Metal (Pd, Zn, Cr and Cu) Content in Roadside Dust Of Dhaka Metropolitan City, Bangladesh, International Research Journal of Environment Sciences, 3(1), 1-5 2014.

Rauret G, Lopes – Sanchez JF, Sahuquillo A, Muntau H, Quevanviller P, Indicative Values for Extractable Contents (mass fractions) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in sediment (CRM 601) following the modified BCR sequential Extraction (three-step) procedures (addendum to EUR Report 17127 EN), EUR 19503 EN. European Commission BCR information reference Materials, Luxembourg, (22), 2000.

Revitt, DM, Hamilton, RS & Warren, RS. The transport of heavy metals within a small urban catchment. The Science of the Total Environment, (93), 359-373. 1990.

Riedel G. F. Copper, Ecotoxicol, 778-783, 2008.

Romieu, I, Chaudhary, Madhu, Paschal, Daniel C., Ting, Bill, E, Crawford, Harry. H. Determining lead sources in Mexico using the lead isotope ratio, 2003.

Ruby M., Davis A., Link T., Schoof R., Channey R., Freeman G., & Bergstrom P. *Development of a an in vitro screening test to evaluate the in vivo bioaccessibility of ingested mine-waste lead*, Env. Sci. Technol., (27), 2870-2877, 1993.

Ruby, M., Davis, A, Shoof, R ., Eberle, S & Sellstone, C. Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test. Environ. Sci. Tech. 30: 2, 422-429, 1996.

Sandstead H. Requirements and toxicity of essential trace elements, illustrated by zinc and copper, *Am. J. Clin. Nutr.* 61: 621S-4S, 1995.

Saparks D. L. (1995). "Environmental Soil Chemistry", Department of plant and soil sciences University of Delaware. Academic Press, 24-25, 1995.

Sepúlveda Volke Tania, Trejo Velasco Juan & Pérez Rosa David A, *Suelos Contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, 2005.

Tamrakar, C.S, Shakya, P.R, *Assessnt of heavy metals in street dus in Kathmandu Metropolitan City and their Possible Impacts on the Environment*, *pak.j.Anal. Environ. Chem*, (12), 32-41, 2011.

Tokatlioglu S. & Kartal S. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the organized industrial district in Kayseri (Turkey). *Atmos. Environ.* , 40: 2797-2805, 2006.

Tokatlioglu S., Kartal S. & Elci L, *Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four stage sequential extraction procedure*. *Anal. Chim. Acta*, (413), 33-40, 2000.

Turiguide México Disponible en "<http://www.turiguide.com/>" consultado 5 de octubre del 2015.

UNEP/WHO. *Methodology Reviews Vol. 3: Measurement of suspended particulate matter in ambient air* WHO/EOS/94.3, UNEP/GEM/94.A.4.1-25. 1994

Us EPA, *Guidace Manual for the integrated Exposure uptake Biokinetic Model for Lead in Chilfren*, U.S. Environmental Protecction Agency, Office Of Emergency and Remedial Response, Washington,D.C, 1994.

Wang Jinman, Liu Weihong, Yang Ruixuan and Ma Jianjun, *Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in reclaimed soils at an opencast coal mine*, *Diaster Advances*, 6 (3), 2013.

- Welte B. & Montiel A., *Etude de differentes methods de speciation des metaux lourds dans les sediments*, Env. Tech. Letters, (4), 223-238, 1983.
- Van Wunen Jh, Clausing P, Brunekreef B, Estimated Soil Ingestion By Children. Environ Res, (51), 147- 162, 1990.
- Valdivia I. M., Intoxicación por plomo, Rev. Soc. Per. Med. Inter. 18(1), 2005.
- Vuori R., Huunan–Seppala A., Kilpio J. O., Salmela S. S. Biologically active metals in human tissues: II. The effect of age on the concentration of Cd in aorta, heart, kidney, liver, lung, pancreas and skeletal muscle, Scand J Work Environ Health; 5: 16-48, 1979.
- Zhuang, G., Huang, R., Wang, M., Zhou, Q., Guo, J., Yuan, H. & Rao, Z. Great progress in study on aerosol and its impact in the global environment. Prog. Natural Sci, 12(6), 407–413, 2002.
- Zhu, Bian, B, y Li, L, Heavy meal contamination of road-deposited sediments in a médium size city of Chine. Environmental Monitoring and Assssment, 147 (1-3), 171-181, 2008.